

SAVOIR POLAIRE

# Aqhaliat

RAPPORT 2019





Pour obtenir de plus amples renseignements sur Savoir polaire Canada ou pour obtenir d'autres exemplaires de ce rapport, veuillez communiquer avec :

Savoir polaire Canada  
campus de la Station canadienne de recherche dans l'Extrême-Arctique  
1 rue Uvajuq  
boîte postale 2150  
Cambridge Bay, NU, X0B 0C0  
Canada

courriel : [info@polar.gc.ca](mailto:info@polar.gc.ca)  
téléphone : 1-877-221-6213  
télécopieur : 1-613-947-2410



Twitter:  
[@POLAIRECanada](https://twitter.com/POLAIRECanada)



Instagram:  
[@savoir.polaire](https://www.instagram.com/savoir.polaire)



Facebook:  
[@Savoirpolaire](https://www.facebook.com/Savoirpolaire)

Site Web : <https://www.canada.ca/fr/polar-knowledge/aqhaliat.html>

This work is published in English under the title:  
Polar Knowledge: Aqhaliat Report

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, 2019



*Savoir polaire : Rapport Aqhaliat*

**ISSN 2562-6078**

# Table des matières

Écologie migratoire et écologie de la reproduction des oiseaux confrontés aux changements climatiques mondiaux : rapport des campagnes sur le terrain 2017 et 2018 .....	1
Classification des écosystèmes biogéoclimatiques arctiques-subarctiques canadiens (Canadian Arctic–Subarctic Biogeoclimatic Ecosystem Classification, CASBEC) : Cadre, concepts clés, cartographie et utilisation.....	8
Échange net d'écosystème dans le pergélisol de Cambridge Bay, au Nunavut, Canada .....	22
Évaluation et surveillance du pergélisol dans le parc territorial de Kugluk, au Nunavut, dans une perspective de sensibilisation de la communauté.....	31
Conception d'un véhicule aérien sans pilote fait par soi-même à des fins de recherche arctique et démonstration de ses capacités au moyen de prélèvements d'épaisseur de neige par une structure en mouvement.. .....	41
Accroître la sécurité et l'efficacité de l'utilisation de la glace de mer par la communauté dans la région de Kitikmeot à l'aide du développement et du partage d'images de télédétection. ....	61
Traitement des eaux grises et réemploi dans les édifices et communautés nordiques – résultats d'un projet-pilote.....	74
Rendement d'un système bibloc de ventilation par récupération d'énergie pour une utilisation dans des habitations arctiques.....	85
Sensibilisation aux STIM pour les jeunes et les éducateurs de la région Beaufort-Delta des Territoires du Nord-Ouest.....	95
<i>Accord sur le renforcement de la coopération scientifique internationale dans l'Arctique : réflexions sur le rôle du Canada .....</i>	<i>103</i>

# ÉCOLOGIE MIGRATOIRE ET ÉCOLOGIE DE LA REPRODUCTION DES OISEAUX CONFRONTÉS AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES MONDIAUX :

rapport des campagnes sur le terrain 2017 et 2018.

**J.-F. Lamarre<sup>1\*</sup>, A. Pedersen<sup>1</sup>, J. Tiktalek<sup>1</sup> et E.L. Sutherland<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> *Savoir polaire Canada, Cambridge Bay, Nunavut, Canada*

<sup>2</sup> *Département des sciences des ressources naturelles, Université McGill, Ste Anne-de-Bellevue, Québec, Canada*

\*[Jean-Francois.Lamarre@polar-polaire.gc.ca](mailto:Jean-Francois.Lamarre@polar-polaire.gc.ca)

## Résumé

L'Arctique connaît le taux de changements climatiques le plus rapide sur la planète. Dans le cadre de l'apport du Canada à la recherche sur l'Arctique, le campus de la Station canadienne de recherche dans l'Extrême-Arctique (SCREA) à Cambridge Bay, au Nunavut a récemment été établi. Cette infrastructure de recherche majeure soutient la surveillance à long terme et la recherche, y compris la recherche sur l'écologie terrestre et la migration des oiseaux.

Les oiseaux migratoires sont les sentinelles des changements climatiques mondiaux et la population de nombreuses espèces est en déclin à l'échelle mondiale. Pour ce qui est de la reproduction, le moment et la réussite de la reproduction peuvent être liés à des événements qui se sont produits à des milliers de kilomètres de là, dans des régions pouvant être grandement affectées par le développement humain.

Une plus grande connaissance de l'espace migratoire utilisé par la faune tout au long de l'année, ainsi que des variations des interactions entre les espèces dans le temps et l'espace, aiderait à définir les stress vécus par les différentes espèces.

L'objectif du présent projet de recherche est de surveiller la reproduction et la migration des oiseaux nicheurs migrateurs de l'Arctique (espèces prédatrices et proies), notamment leurs habitats de nidification, la densité de nicheurs, les tendances de population et les besoins de migration. Depuis 2017, ce programme de recherche a surveillé divers aspects de l'écologie des oiseaux migratoires autour de Cambridge Bay, et plus particulièrement chez la colonie d'oie des neiges (*Chen caerulescens*) établie à proximité, et le moment, la densité et la réussite de la nidification des différentes espèces d'oiseaux de rivage. La pression de prédation a également été surveillée au moyen d'expériences utilisant des nids artificiels, des comptages quotidiens des espèces vertébrées et d'observation des espèces errantes notables. Le présent rapport présente la méthodologie employée pour ces activités de recherche, les résultats préliminaires ainsi que les champs de développement potentiels du programme de recherche au cours des prochaines années.

## Introduction

La recherche à long terme nécessite des infrastructures de grande qualité pour permettre une surveillance exacte des changements climatiques, tout en

Référence suggérée :

Lamarre, J.-F., Pedersen, A., Tiktalek, J. et Sutherland, E.L. 2019. *Écologie migratoire et écologie de la reproduction des oiseaux confrontés aux changements climatiques mondiaux : rapport des campagnes sur le terrain 2017 et 2018*. *Savoir polaire* : Aqhaliat 2019, *Savoir polaire Canada*, p. 1–7. DOI: 10.35298/pkc.2019.01

soutenant l'adaptation des communautés locales et le renforcement des capacités. Bien que l'Arctique est l'endroit qui devrait être le plus touché par les changements climatiques (Bush et Lemmen, 2019), il y a un manque de recherches réalisées dans la région (Metcalf et al., 2018) et les quelques stations de recherche accueillant des chercheurs ne sont actives que pendant les mois les plus chauds de l'année. Le campus de la Station canadienne de recherche dans l'Extrême-Arctique (SCREA) a récemment été établi à Cambridge Bay, au Nunavut. Cette infrastructure de recherche d'importance est exploitée par Savoir polaire Canada, une agence fédérale créée en 2015. Situé dans l'Extrême-Arctique, le campus de la SCREA soutient la surveillance à long terme et la recherche à l'année.

L'objectif de ce programme de recherche est de surveiller l'écologie de reproduction et l'écologie migratoire des oiseaux nicheurs migratoires de l'Arctique. La présente recherche sera utilisée pour créer une banque de données à long terme qui servira à la gestion des animaux sauvages, à la surveillance de l'état de l'environnement et aux efforts de conservation des espèces. Ces données seront accessibles aux scientifiques et au public à des fins éducatives et de recherche. La présente recherche se concentre sur les espèces prédatrices et les proies, les habitats de nidification, les densités de nicheurs, les tendances de population et les besoins de migration. Pendant la saison de reproduction, les oiseaux de rivage et les oiseaux chanteurs s'attaquent aux arthropodes terrestres. L'émergence des arthropodes est fortement liée à la température et des variations sont attendues dans un contexte de changements climatiques (Tulp et Schekkerman, 2008). Les lemmings jouent également un rôle essentiel dans l'écosystème. Résidant à l'année dans la toundra arctique, la variation de la population de lemming au fil du temps à une incidence sur la réussite reproductive et la productivité des prédateurs (Ims et Fuglei, 2005).

Les animaux migratoires souffrent actuellement d'un déclin mondial et leur conservation nécessite la compréhension des espaces qu'ils utilisent tout au long de l'année (Wilcove et Wikelski, 2008 ; Meltotte et al., 2013). Ce qui se passe ailleurs dans le monde a une incidence sur les différentes espèces migratoires observées dans le Nord, puisqu'elles passent la majorité de leur cycle annuel à l'extérieur de l'Arctique. Puisqu'ils voyagent entre plusieurs écosystèmes, certains allant aussi loin qu'en Antarctique (p. ex. la sterne arctique,

*Sterna paradisaea* (Hatch, 2002)), les oiseaux migratoires font office d'espèces sentinelles. Les observations relatives à l'abondance et à la santé des populations d'oiseaux migratoires dans l'Arctique reflètent la qualité générale des habitats qu'ils utilisent pendant l'année (Piersma et Lindström, 2004).

Ce rapport présente les travaux en cours au campus de la SCREA sur l'écologie des oiseaux. Il décrit l'approche par échantillonnage utilisée et offre quelques résultats des campagnes sur le terrain 2017 et 2018. Il est à noter que le programme de recherche sur l'écologie migratoire et l'écologie de la reproduction des oiseaux au campus de la SCREA en est à ses débuts. Considérant le coût élevé des recherches dans l'Arctique et les efforts requis pour obtenir une compréhension globale de l'environnement, les membres de l'équipe locale s'efforcent de collaborer et de travailler en partenariat avec les organisations et les chercheurs locaux, nationaux et internationaux.

## Méthodes de surveillance et de suivi

### Proies des oiseaux de rivage et des oiseaux chanteurs

En 2018, la variation régionale de la diversité et de l'abondance des arthropodes ont été évaluées en déployant des pièges Malaise pendant de longues périodes de temps. Ces travaux ont été réalisés en collaboration avec l'Université de Guelph.

### Petits mammifères

Avec le soutien d'experts du Musée canadien de la nature (Dr. Dominique Fauteux), un programme de surveillance des petits mammifères (principalement des lemmings) a été créé. En 2018, des lemmings ont été recueillis au moyen de pièges à rats pour la collection du Musée canadien de la nature et pour de l'échantillonnage de tissus.

### Oiseaux

Tant en 2017 qu'en 2018, des données ont été recueillies de façon opportuniste et systématique grâce à l'utilisation de transects et de zones d'étude. Les points de données sur la biodiversité comprennent l'emplacement, l'abondance selon le sexe, l'âge (adulte ou juvénile) et le statut (reproduction locale ou non).

En 2018, des transects de biodiversité de 200 mètres (m) ont été réalisés près de Cambridge Bay, dans une

parcelle de suivi au nord-ouest de Greiner Lake. Des nids d'oiseaux de rivage ont été trouvés de façon opportune et des œufs ont été mis à flotter, pour évaluer le moment où ils ont été pondus, et mesurés (poids, largeur et longueur) pour établir l'étape d'accouaison de la nichée (Liebezeit et al., 2007). Les nids ont ensuite été revisités pour connaître leur sort (p. ex. réussite ou échec).

Les oies des neiges (*Chen caerulescens*) sont jugées extrêmement abondantes et ont donc une grande incidence sur l'écosystème de la toundra (Batt, 1998 ; Jefferies et al., 2004, 2011 ; Flemming et al., 2016, 2019a, b ; Lamarre et al., 2017). Deux colonies d'oies ont été recensées près des Cambridge Bay (colonies d'oies d'Anderson Bay (centre à environ 50 kilomètres (km) et d'Icebreaker (centre à 120 km)). Lors de ces recensements, l'altitude des vols d'hélicoptères a été maintenue à au moins 300 m afin de délimiter les colonies d'oies et d'établir si elles s'étaient développées en comparaison des recensements antérieurs (Kerbes et al., 2014).

De plus, en 2018, de petits appareils ont été installés (moins de 10 x 10 x 10 centimètres (cm)) au centre de notre principale parcelle de surveillance. Ces appareils ont été utilisés pour enregistrer les sons et tester une autre méthode de surveillance de la biodiversité, en collaboration avec des chercheurs de l'Université de Moncton.

### Autres espèces

Des terriers de renards ont été découverts, cartographiés et surveillés pour dénombrer le nombre de renardeaux. De la matière fécale de renard a été recueillie en vue d'examiner leur diète et leurs parasites. De plus, des transects de matière fécale (chacun constitué de 10 parcelles continues de 1 m<sup>2</sup>) ont été utilisés pour obtenir une approximation de l'abondance d'herbivores. Cinq groupes d'espèces ont été étudiés :

1. oies (*Anser spp.* et *Branta spp.*) ;
2. lièvres (*Lepus arcticus*) ;
3. lagopèdes (*Lagopus lagopus*, *Lagopus muta*) ;
4. caribous (*Rangifer tarandus*) ; et
5. bœufs musqués (*Ovibos moschatus*).

### Voies de migration des espèces migratoires

Le programme de suivi a pour objectif d'identifier les régions clés utilisées par les espèces migratoires afin de définir les régions d'utilisations importantes dans leurs parcours. Dans le cadre des activités de recherche de ce programme, des technologies comme le GPS sont utilisées pour suivre les voies de migration des espèces. Pour la campagne terrain de 2018, des pluviers bronzés (*pluvialis dominica*) ont été ciblés. Ce suivi a été réalisé en collaboration avec le projet Arctic Shorebird Tracking dirigé par Manomet Inc. et le United States Fish and Wildlife Service – Alaska, en partenariat avec l'Université McGill (Dr. Kyle Elliot). Lorsque les nids de pluviers bronzés ont été trouvés, les adultes ont été capturés dans le nid à l'aide d'une nasse. Les oiseaux ont été bagués à proximité de leur nid, et munis d'un appareil GPS (Lotek Pinpoint GPS Argos 75, 4,1 grammes). Le poids des appareils GPS représente moins de 5 % de la masse du pluvier, conformément aux normes d'utilisation des oiseaux en science des « Guidelines to the Use of Wild Birds in Research » (Fair et al., 2010). Des mesures de base et des échantillons ont été prélevés (sang et plumes).

## Résultats et analyse

### Proies des oiseaux de rivage et des oiseaux chanteurs

Pendant la campagne sur le terrain de 2018, des échantillons ont été recueillis hebdomadairement dans les pièges Malaise. L'identification des espèces est en cours par nos collaborateurs de l'Université Guelph.

### Petits mammifères

Malheureusement, en raison de la fonte des neiges, les activités de trappe ont été restreintes et les activités du programme de recherche se sont principalement limitées à une région sans neige à Augustus Hills, à l'ouest de Cambridge Bay. Cinq lemmings à collerette et trois lemmings bruns ont été capturés. Des organes ont été recueillis à des fins d'études épidémiologiques par des collèges de l'Université de Saskatchewan et de l'Université de Calgary. Il est probable que l'année 2018 était une année d'abondance chez les lemmings, puisqu'il était facile de trouver des signes d'activités (tunnels de lemmings, défécations fraîches et des nids d'hiver déterrés par des renards) et que des prédateurs étaient souvent aperçus. Toutefois, il est nécessaire de réaliser des recensements plus détaillés sur plusieurs années

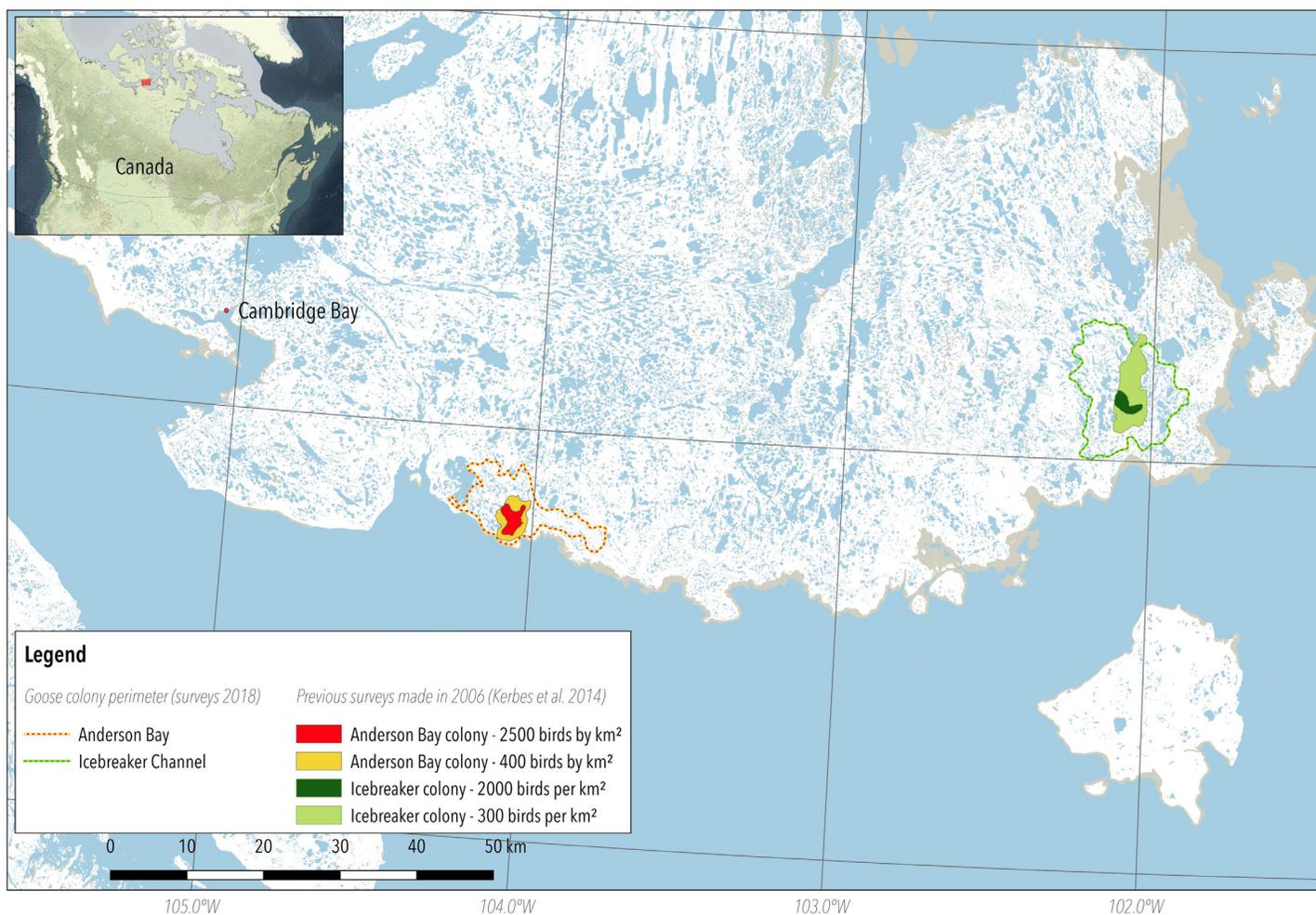


Figure 1 : Colonies d'oies des neiges dans le sud-est de l'île Victoria : Anderson Bay et Icebreaker. L'étendue trouvée en 2006 est présentée par densité pour les deux colonies, conformément à la publication de Kerbes et al., (2014). Les lignes oranges et vertes représentent l'étendue découverte lors des recensements de 2018.

pour établir la densité des lemmings et leur variation au fil du temps.

## Oiseaux

En 2018, une région de la côte ouest de Greiner Lake a été principalement étudiée, mais d'autres sites près de Cambridge Bay (aux alentours de Water Lake) ont également été visités. Seize nids d'oiseaux de rivage ont été trouvés, l'espèce la plus abondante étant le pluvier bronzé (10 nids, moyenne du début de la nidification le 19 juin). La seconde espèce la plus abondante dont la nichée a été observée est le bécasseau semipalmé (*Calidris pusila*, 5 nids, moyenne du début de la nidification le 23 juin). Un nid de bécasseau à échasse a également été trouvé (*Calidris himantopus*, 1 nid, le début de la nidification étant le 21 juin). Les dates de nidification ont principalement été obtenues par la flottaison des œufs (12 nids), mais également selon la fin de la ponte (2 nids) et la date d'éclosion (2 nids).

Le taux de réussite de la nidification a été d'environ 56 % (9 nichées ont éclos). D'autres ont échoué pour cause de prédation (3 nids, environ 19 %) ou ont eu un destin inconnu (4 nids, 25 %). L'enregistreur des sons de la biodiversité a été récupéré et l'année complète de données est actuellement analysée par des chercheurs de l'Université de Moncton.

Le 25 juin 2018, un recensement aérien de deux colonies d'oies des neiges a été réalisé au-dessus de la partie sud-est de l'île Victoria, conformément à la documentation réalisée par Kerbes et al., (2014). Les deux colonies se sont développées dans cette région. En 2006, la colonie d'oie d'Anderson Bay comptait environ 21 500 oies nicheuses sur une zone d'environ 20 km<sup>2</sup> (Figure 1). La zone de nichée trouvée en 2018 était d'environ 100 km<sup>2</sup>. Pour ce qui est de la colonie d'oie d'Icebreaker, en 2006, elle comptait environ 16 642 oies nicheuses sur une zone d'environ 38 km<sup>2</sup> (Figure 1). La zone de nichée observée

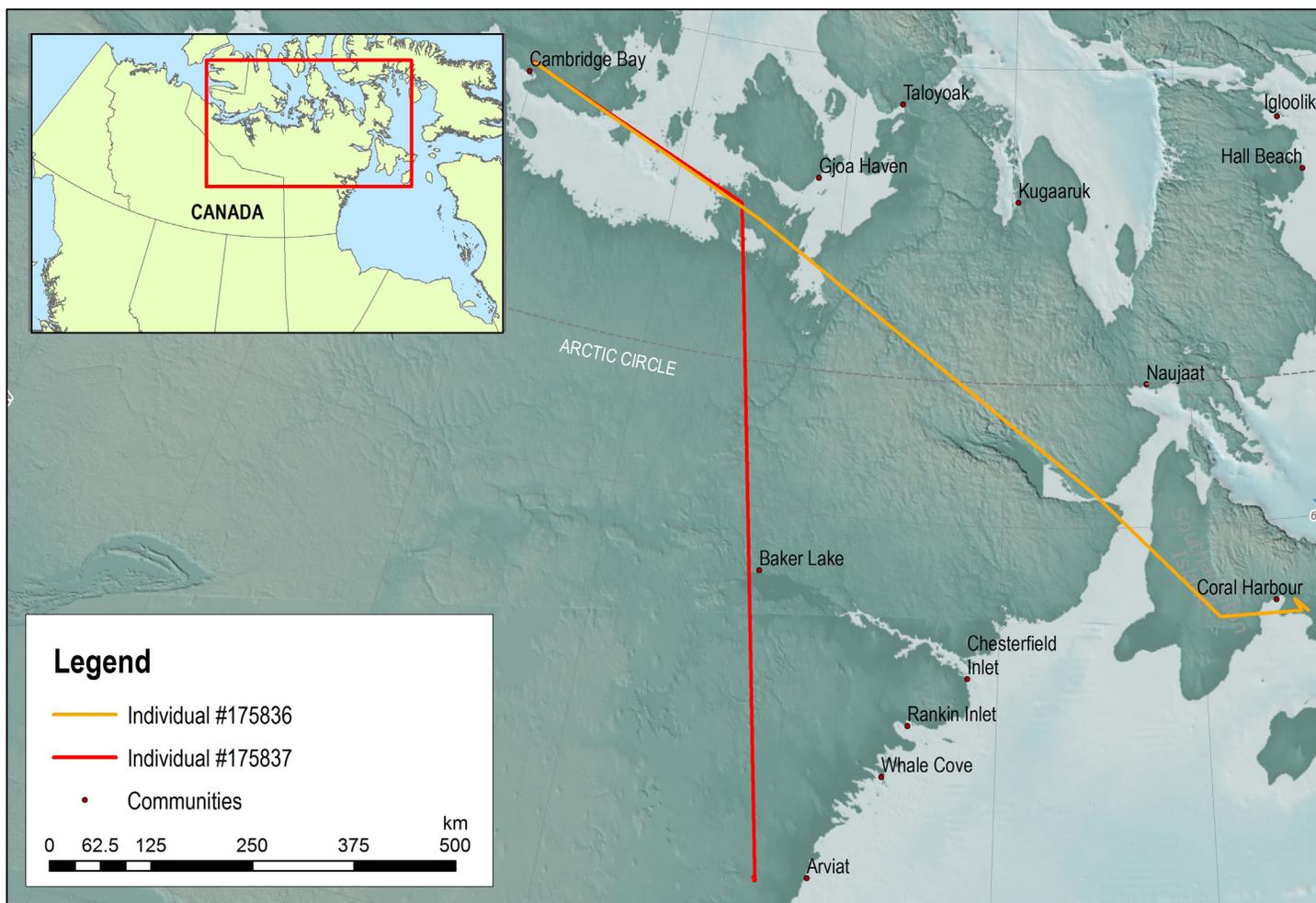


Figure 2 : Voies de migration de deux pluviers bronzés (*Pluvialis dominica*) balisés pendant la saison de reproduction 2018, près de Cambridge Bay, au Nunavut.

en 2018 était d'environ 180 km<sup>2</sup>. Pour ces deux colonies d'oies, cela représente une augmentation d'environ cinq fois la taille de la colonie dans cette région depuis les 12 dernières années. Ce développement est cohérent avec les autres types de recensements menés en 2011 dans le sud-est de l'Île Victoria, où on estimait qu'environ 130 000 oies nichaient (Groves et Mallek, 2012). Bien que les photos aériennes ont été prises à partir d'un hélicoptère, la résolution n'était pas suffisante pour dénombrer les oiseaux nicheurs. Les protocoles de recherche seront ajustés pour mieux estimer l'abondance d'oies en 2019 et documenter la façon dont la région est touchée par le changement d'abondance chez les oies.

### Autres espèces

En 2018, un terrier de renard actif a été découvert avec neuf renardeaux l'habitant le 1<sup>er</sup> juillet, ce qui offre une nouvelle preuve de la grande abondance de lemmings cette année-là, qui constituent la principale proie des

renards. 35 transects ont été réalisés afin d'obtenir une estimation de l'abondance d'herbivore au moyen d'un dépouillement de la matière fécale. Ces données contribuent à la base de données du Interaction Working Group (Gilg et al., 2018) qui étudie l'incidence des interactions indirectes dans l'écosystème de la toundra dans un réseau de sites circumpolaire.

### Voies de migration des espèces migratoires

Trois balises Argos Pinpoint-120 GPS ont été installées sur des nichées de pluviers bronzés à Cambridge Bay. Des balises ont également été déployées dans plusieurs sites en Alaska (Utqiagvik (Barrow), Prudhoe Bay, et Canning Bay). Malheureusement, les balises déployées près de Cambridge Bay n'ont pas transmis les points de repère GPS pendant toute la durée de la migration d'automne. Les emplacements ont été enregistrés jusqu'au Bassin de Foxe et à la Baie d'Hudson (Figure 2) et une balise n'a jamais quitté les environs de Cambridge Bay. Parmi les

raisons possibles de cette situation, on retrouve la perte de balise, la mort de l'oiseau ou la perte d'autonomie de la pile. Les balises seront récupérées, si possible, pendant la campagne terrain de 2019 et plus de balises seront déployées dans la région entourant Cambridge Bay.

Les données de migration 2018 obtenues par le Arctic Shorebird Tracking Project portant sur 13 oiseaux seront utilisées pour soutenir une thèse de premier cycle avec honneur à l'Université McGill. Cette thèse portera sur le moment de la migration, déterminé en fonction d'indices météorologiques comme la température et la vitesse du vent. Ce projet permettra de mieux comprendre la relation entre la migration aviaire et les conditions météorologiques, et les facteurs ayant une incidence sur la migration des pluviers bronzés.

## Projets pour 2019

Les activités de recherche se poursuivront en 2019 pour construire un ensemble de données sur l'écologie des oiseaux migrateurs. Afin de faciliter la localisation de sites de niche des espèces cryptiques, des recensements par drones, à l'aide de capteurs thermiques et optiques, seront lancés lorsque l'accouaison aura commencé. En collaboration avec des chercheurs de l'Université Moncton, des campagnes de recherche temporaires seront établies près des deux colonies d'oies (Anderson Bay et Icebreaker) afin d'observer l'incidence des oies sur la biodiversité. Un périmètre de recensement de base sera réalisé chaque année sur ces deux colonies et les activités de recherche s'étendront à une autre colonie rapprochée se trouvant sur l'île Jenny Lind.

De plus, en partenariat avec des chasseurs locaux, le programme de recherche fera l'essai d'une station de plumaison locale pour les oies blanches chassées, qui sont en surabondance. Les chasseurs pourront utiliser cette machine pour accélérer la plumaison des oies tuées. Cela permettra de réaliser des mesures de base des oies (p.ex. le poids, la masse grasseuse et la longueur des ailes), de détailler le nombre d'oies chassées et leur emplacement et de réaliser de l'échantillonnage de tissus de base. Cette station se trouvera initialement sur le campus de la SCREA et pourra également être installée sur une remorque ou un traîneau pour la déplacer plus près de l'emplacement de la chasse.

Le programme de recherche continuera de développer un programme de surveillance de la migration prévoyant l'ajout potentiel de nouvelles espèces pour mieux documenter la façon dont les oiseaux relient l'Arctique au reste du monde.

La réussite de ces travaux repose sur la création de partenariats solides avec de nombreux chercheurs et organismes locaux, nationaux et internationaux. Ce programme de recherche a pour objectif de coordonner ses efforts afin d'assurer une vaste couverture spatiale et de cibler le plus d'espèces possible pour étendre les connaissances sur l'écologie des oiseaux migrateurs dans le centre de l'Arctique canadien.

## Références

- Batt, B.D.J. (ed.) 1998. The Greater Snow Goose: Report of the Arctic Goose Habitat Working Group. Arctic Goose Joint Venture Special Publication. U.S. Fish and Wildlife Service, Washington, D.C. and Canadian Wildlife Service, Ottawa, Ontario.
- Bush, E., Lemmen, D.S. (eds.) 2019. Canada's Changing Climate Report. Government of Canada, Ottawa, Canada. 444 p.
- Flemming, S.A., Calvert, A., Nol, E., Smith, P.A. 2016. Do hyperabundant Arctic-nesting geese pose a problem for sympatric species? *Environmental Reviews*, 24(4):1–10. doi: 10.1139/er-2016-0007.
- Flemming, S.A., Nol, E., Kennedy, L.V., Smith, P.A. 2019a. Hyperabundant herbivores limit habitat availability and influence nest site selection of Arctic-breeding birds. *Journal of Applied Ecology*, 56(4):976–987. doi: 10.1111/1365-2664.13336.
- Flemming, S.A., Smith, P.A., Rausch, J., Nol, E. 2019b. Broad-scale changes in tundra-nesting bird abundance in response to hyperabundant geese. *Ecosphere*, 10(7). doi: 10.1002/ecs2.2785.
- Fair, J., Paul, E., Jones, J. (eds.) 2010. Guidelines to the use of wild birds in research – Third Edition. The Ornithological Council, Special Publication. Washington, DC, USA.

- Gilg, O., Giroux, M.-A., Bety, J., et al. 2018. "Interactions Working Group": A circumpolar initiative to measure and predict the cascading impacts of "Indirect Trophic Interactions" in Arctic terrestrial vertebrate communities. Presented at: Arctic Biodiversity Congress 2018. Rovaniemi, Finland. Available from: <https://arcticbiodiversity.is/index.php/program/presentations2018?own=0&limit=20&limitstart=240>
- Groves, D.J., Mallek, E.J. 2012. Migratory bird survey in the western and central Canadian Arctic, 2011. U.S. Fish and Wildlife Service, Juneau, AK, USA.
- Hatch, J.J. 2002. Arctic Tern (*Sterna paradisaea*), version 2.0. In the Birds of North America (A.F. Poole and F.B. Gill, Editors). Cornell Lab of Ornithology, Ithaca, NY, USA. doi: 10.2173/bna.707.
- Ims, R.A., Fuglei, E. 2005. Trophic Interaction Cycles in Tundra Ecosystems and the Impact of Climate Change. *BioScience*, 55(4):311–322. doi: 10.1641/0006-3568(2005)055[0311:TICITE]2.0.CO;2.
- Jefferies, R.L., Rockwell, R.F., Abraham, K.F. 2004. Agricultural food subsidies, migratory connectivity and large-scale disturbance in arctic coastal systems: a case study. *Integrative and Comparative Biology*, 44(2):130–139.
- Jefferies, R.L., Rockwell, R.F., Abraham, K.F. 2011. The embarrassment of riches: Agricultural food subsidies, high goose numbers, and loss of Arctic wetlands – A continuing saga. *Environmental Reviews*, 11(4): 193–232.
- Kerbes, R.H., Meeres, K.M., Alisauskas, R.T. 2014. Surveys of nesting lesser snow geese and ross's geese in arctic Canada, 2002–2009. Arctic Goose Joint Venture Special Publication. U.S. Fish and Wildlife Service, Washington, D.C. and Canadian Wildlife Service, Ottawa, Ontario.
- Lamarre, J.-F., Legagneux, P., Gauthier, G., et al. 2017. Predator-mediated negative effects of overabundant snow geese on arctic-nesting shorebirds. *Ecosphere*, 8(5). doi: 10.1002/ecs2.1788.
- Liebezeit, J.R., Smith, P.A., Lanctot, R.B., et al. 2007. Assessing the development of shorebird eggs using the flotation method: species-specific and generalized regression models. *The Condor*, 109(1):32–47. doi: 10.1650/0010-5422(2007)109[32:ATDOSE]2.0.CO;2.
- Meltofte, H. (ed.) 2013. Arctic biodiversity assessment: Status and trends in arctic biodiversity. Conservation of Arctic Flora and Auna, Akureyri.
- Metcalfe, D.B., Hermans, T.D.G., Ahlstrand, J., et al. 2018. Patchy field sampling biases understanding of climate change impacts across the Arctic. *Nature Ecology & Evolution*, 2:1443–1448. doi: 10.1038/s41559-018-0612-5.
- Piersma, T., Lindström, Å. 2004. Migrating shorebirds as integrative sentinels of global environmental change. *IBIS International Journal of Avian Science*, 146(s1):61–69. doi: 10.1111/j.1474-919X.2004.00329.x.
- Tulp, I., Schekkerman, H. 2008. Has prey availability for Arctic birds advanced with climate change? Hindcasting the abundance of tundra arthropods using weather and seasonal variations. *Arctic*, 61(1):48–60.
- Wilcove, D.S., Wikelski, M. 2008. Going, going, gone: Is animal migration disappearing. *PLOS Biology*, 6(7):e188. doi: 10.1371/journal.pbio.0060188.

# CLASSIFICATION DES ÉCOSYSTÈMES BIOGÉOCLIMATIQUES ARCTIQUES-SUBARCTIQUES CANADIENS (CANADIAN ARCTIC-SUBARCTIC BIOGEOCLIMATIC ECOSYSTEM CLASSIFICATION, CASBEC) :

Cadre, concepts clés, cartographie et utilisation

**D.S. McLennan<sup>1\*</sup>, W.H. MacKenzie<sup>2</sup>, D.V. Meidinger<sup>3</sup>, S. Ponomarenko<sup>4</sup>, J. Wagner<sup>1</sup>, R.J. McKillop<sup>5</sup>, et H.T. Robitaille<sup>6</sup>**

<sup>1</sup> *Savoir polaire Canada, Station canadienne de recherche dans l'Extrême-Arctique, Cambridge Bay, Nunavut, Canada*

<sup>2</sup> *BC Ministry of Forests, Lands and Natural Resource Operations, Skeena-Stikine District Office, Smithers, Colombie-Britannique, Canada*

<sup>3</sup> *Meidinger Ecological Consultants Ltd, Victoria, Colombie-Britannique, Canada*

<sup>4</sup> *Environnement et changement climatique Canada, Centre national de recherche faunique, Ottawa, Ontario, Canada*

<sup>5</sup> *Palmer Environmental Consulting Group Inc, Toronto, Ontario, Canada*

<sup>6</sup> *T2 Environnement, Canton de Valcourt, Québec, Canada*

\*[donald.mclennan@polar.gc.ca](mailto:donald.mclennan@polar.gc.ca)

## Résumé

Le système de classification des écosystèmes biogéoclimatiques arctiques et subarctiques canadiens (CASBEC) est un cadre de coordination et d'uniformisation de l'identification, de l'interprétation, de la classification et de la cartographie des communautés écologiques terrestres des paysages arctiques et subarctiques du nord du Canada. Fondé sur une théorie écologique solide, le système CASBEC fournit des protocoles normalisés pour la nomenclature et la classification, qui aboutissent à une classification naturelle et hiérarchique basée sur des composantes écologiques observables. Le présent article décrit la nécessité d'un pareil système, la théorie et la structure de la méthode de classification, et les méthodologies de classification et de cartographie des écosystèmes terrestres arctiques et subarctiques. La communauté canadienne des chercheurs et des praticiens consultants en écosystèmes terrestres du Nord est invitée à travailler en collaboration pour mettre en œuvre le système CASBEC. L'intérêt, la contribution et le soutien

à l'uniformisation amélioreront considérablement la coordination, la portée et l'incidence des nombreuses utilisations du système dans les domaines de la recherche, de la surveillance et de la conservation dans le Nord.

## Introduction

Le système de classification des écosystèmes biogéoclimatiques arctiques et subarctiques canadiens (CASBEC) est un cadre de coordination et d'uniformisation de la classification, de l'interprétation et de la cartographie des communautés écologiques terrestres des paysages arctiques et subarctiques du nord du Canada. Proposé comme une approche commune, le système CASBEC facilitera la coordination des travaux écologiques de la même manière que la nomenclature commune des végétaux facilite les études botaniques, c'est-à-dire qu'il fournira un

Référence suggérée :

McLennan, D.S., MacKenzie, W. H., Meidinger, D., Ponomarenko, S., Wagner, J., McKillop, R.J. et Robitaille, H. T. 2019. *Classification des écosystèmes biogéoclimatiques arctiques-subarctiques canadiens (Canadian Arctic-Subarctic Biogeoclimatic Ecosystem Classification, CASBEC) : Cadre, concepts clés, cartographie et utilisation*. Aqhaliat 2019, *Savoir polaire Canada*, p. 8-21. DOI: 10.35298/pkc.2019.02

langage commun pour décrire, classer et nommer des entités similaires afin qu'elles puissent être étudiées et les résultats généralisés à l'ensemble des espèces. Actuellement, la classification et la dénomination des communautés écologiques terrestres arctiques-subarctiques ne sont pas soutenues par une approche commune. L'adoption du système CASBEC serait une étape importante vers l'intégration des classifications locales et régionales afin de disposer d'un système de classification unique et interrelié dans tout le nord du Canada. Comme nous l'expliquons dans le présent article, l'absence actuelle d'accord rend difficile la coordination de la recherche et de la surveillance, l'extrapolation des résultats aux niveaux régional et national, la coordination des évaluations régionales des habitats et des effets cumulatifs, et la planification d'une surveillance coordonnée du niveau régional au niveau national.

## Le système CASBEC

Le système CASBEC s'inspire de la structure, de l'approche et des méthodes de la British Columbia's Biogeoclimatic Ecosystem Classification (BCBEC)<sup>1</sup> (Krajina, 1960 ; Pojar et al., 1987 ; Haeussler, 2011 ; MacKenzie et Meidinger, 2017). La BCBEC est fondée sur un siècle de connaissance des sciences des écosystèmes et tire ses racines en Europe (Pogrebnyak, 1930, 1955 ; Braun-Blanquet, 1932 ; 1951, 1964 ; Vorobyov, 1953 ; Sukachev, 1960 ; Sukachev et Dylis, 1964) et en Amérique du Nord (Clements, 1916, 1936 ; Jenny, 1941 ; Major, 1951).

Le système CASBEC repose sur une classification de la végétation des écosystèmes nordiques qui établit un lien au niveau national avec la Classification nationale de la végétation au Canada (CNVC, consultée en 2019), et au niveau international avec l'Arctic Vegetation Archive (Walker et Reynolds, 2011 ; Walker et al., 2013).

L'applicabilité de l'approche BCBEC aux paysages arctiques et subarctiques est bien documentée, tant par son adoption récente par le territoire du Yukon (ministère de l'Environnement du Yukon, 2016) que par des travaux plus anciens sur l'Arctique (Lambert, 1968 ; Barrett, 1972) et des travaux récents dans les parcs nationaux arctiques et subarctiques du Canada (Ponomarenko et al., 2014) et dans la région de la Station canadienne de recherche dans l'Extrême-

Arctique (SCREA), près de Cambridge Bay, au Nunavut (McLennan et al., 2018).

Conformément à la méthode BCBEC, le système CASBEC comprend trois classifications intégrées, comme le démontre la figure 1 .

1. **Une classification centrale et hiérarchique de la composante végétale** des communautés écologiques terrestres, basée sur les données du relevé de végétation, suivant la méthode de classification de la BCBEC et de Braun-Blanquet (MacKenzie et Meidinger, 2017).
2. **Une classification biogéoclimatique** qui utilise la distribution des associations de végétation représentant les communautés végétales matures se trouvant sur les sites zonaires pour délimiter les unités de biogéoclimats régionaux écologiquement équivalents.
3. **Une classification des écosites** qui combine les associations de végétaux matures récurrentes et les environnements où ils se trouvent pour définir des conditions de site écologiquement équivalentes.

Des concepts clés, comme les écosystèmes zonaux et l'équivalence écologique, assurent la cohésion de la structure du système CASBEC. Ces concepts clés seront examinés dans la prochaine rubrique.

## Communauté écologique terrestre

La communauté écologique terrestre (Figure 1) est l'écosystème à l'échelle locale qui se présente comme une entité réelle dans le paysage. Elle fait l'objet d'une classification dans le système CASBEC, mariant les composantes biotiques (communauté végétale) et abiotiques (site écologique) des paysages terrestres. Elle comprend tous les biotes d'un site, des microbes et invertébrés du sol aux végétaux, pathogènes, herbivores et prédateurs qui constituent l'écosystème local. La communauté écologique terrestre comprend également le cadre environnemental physique, les processus et facteurs qui contrôlent en partie la composition biotique, l'abondance et la productivité, ainsi que les interactions entre tous les composés abiotiques et biotiques. Dans le système CASBEC, les communautés écologiques terrestres sont regroupées selon la similarité générale des communautés végétales (classification de la végétation) et les propriétés du site et du sol (classification du site). Cela crée des catégories

<sup>1</sup> Pour une analyse plus détaillée de l'histoire de la BCBEC, voir également Wali (1988).

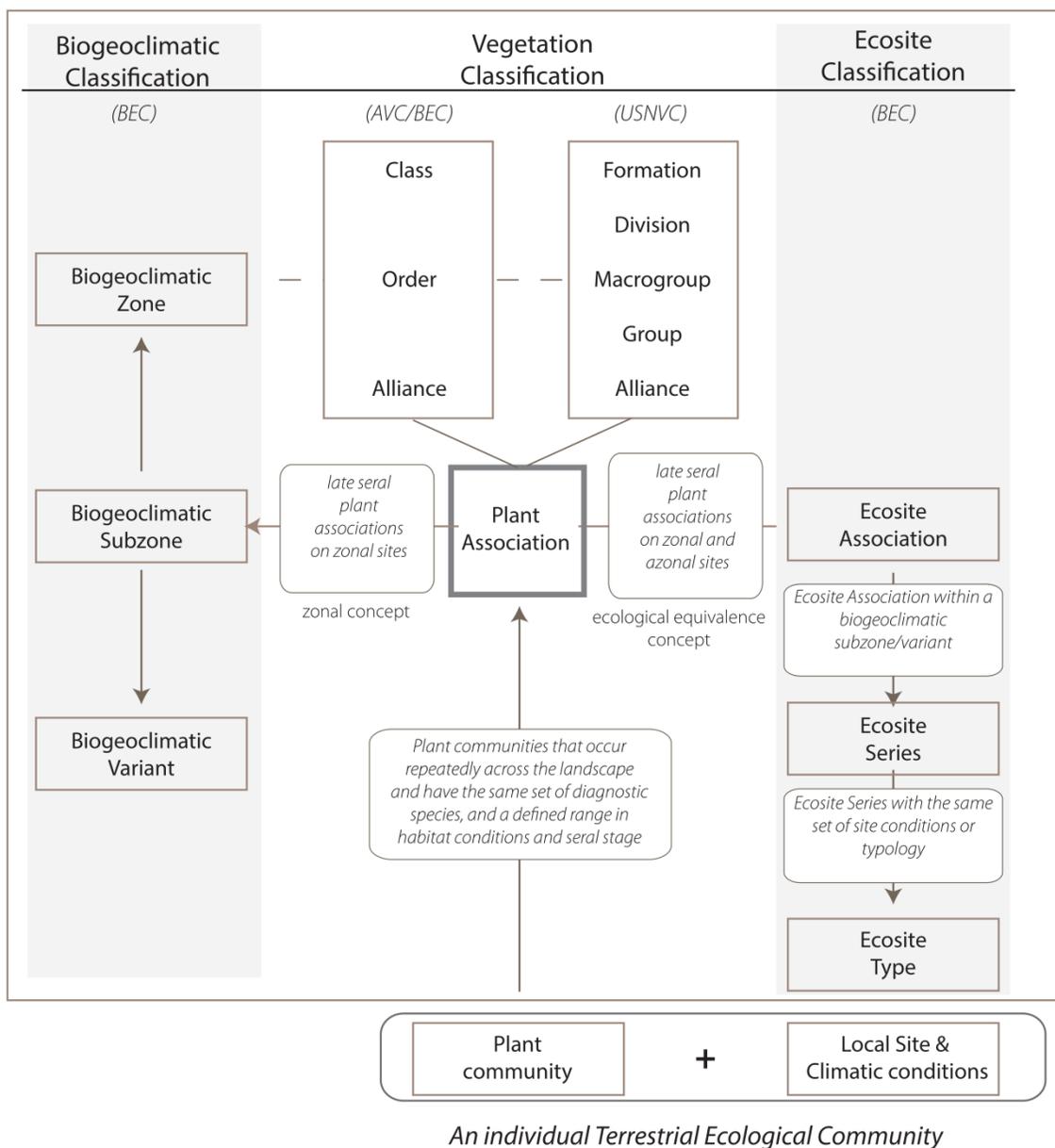


Figure 1 : Le cadre du système CASBEC montrant les liens entre la classification biogéoclimatique et la classification des écosites avec la classification centrale de la végétation, y compris les unités supérieures de la Biogeoclimatic Ecosystem Classification (BEC), la Arctic Vegetation Classification (AVC) et la United States National Vegetation Classification (USNVC). L'Association des végétaux est au cœur du système CASBEC et est liée aux classifications biogéoclimatiques et écosites par les concepts d'équivalence zonale et écologique, respectivement.

relativement uniformes qui sont utiles pour toute une série d'applications de recherche, de surveillance, et d'aménagement du territoire.

### Collecte sur le terrain de données provenant des parcelles de la communauté écologique terrestre

Le système CASBEC commence tout juste à être appliqué dans l'Arctique et le Subarctique. La collecte intensive de données sur les parcelles pour

l'ensemble des communautés écologiques terrestres dans les zones d'étude est essentielle pour élaborer des guides d'excursion, des formations et d'autres outils dont les utilisateurs techniques tirent profit en Colombie-Britannique. Pour établir la classification, des informations détaillées sur l'écosystème (site, sol et végétation) sont recueillies pour toutes les conditions du site de la zone étudiée. L'objectif de la collecte sur le terrain est d'identifier et d'échantillonner toutes les communautés écologiques terrestres

qui existent. Ces informations peuvent ensuite être formellement classées et utilisées pour élaborer une classification des écosystèmes locaux, et souvent une carte des écosystèmes terrestres. Des équipes de terrain spécialisées dans l'identification des espèces vasculaires et non vasculaires, la description des sols et la géomorphologie sont nécessaires pour décrire avec précision les communautés écologiques terrestres.

Une campagne sur le terrain pour un domaine d'étude particulier s'effectue idéalement en deux saisons de travaux : la première est une phase de reconnaissance et de description générale de l'écosystème utilisée pour élaborer un projet de classification de l'écosystème, et la seconde est utilisée pour confirmer la classification et recueillir plus de données au besoin pour terminer le projet de classification de la zone. Voici une brève description des principales étapes et principaux objectifs d'une campagne typique de deux ans. Dans de nombreux cas, il sera nécessaire de créer des cartes des écosystèmes classant les unités comme des polygones cartographiques (les approches cartographiques seront abordées dans un futur manuscrit).

1. Recueillir le plus de renseignements complémentaires possible sur la zone étudiée. Par exemple, des études, des rapports et des cartes sur la géologie du socle rocheux, l'histoire glaciaire et postglaciaire, la géologie de surface, les sols, le pergélisol, la végétation, la couverture et l'utilisation des terres, la présence et l'habitat de la faune et de la flore, ainsi que les données de télédétection disponibles, notamment des photos aériennes récentes et historiques, des images satellites et des données topographiques. Les informations provenant de toutes les sources sont utilisées pour élaborer une hypothèse de travail sur la végétation et les principaux facteurs écologiques contrôlant la composition, la structure, la productivité et la distribution des écosystèmes (par exemple, les gradients hydrologiques, les principales formes de relief et les propriétés du sol). L'analyse des photos aériennes, de l'imagerie et des données topographiques fournit des renseignements importants sur la répartition spatiale des communautés écologiques terrestres dans le paysage (par exemple, les hautes terres et les terres humides, les plaines inondables et les estuaires) et est utilisée pour générer un plan d'échantillonnage pour la campagne sur le terrain.
2. Concevoir un échantillonnage sur le terrain des caractéristiques du site, du sol et de la végétation pour toute la gamme des écosystèmes locaux potentiels et le long des pentes écologiques prédominantes. Les sites d'échantillonnage sont choisis de préférence en fonction de la définition d'une communauté écologique terrestre - une zone du paysage relativement uniforme en termes de composition et de structure de la végétation, et de propriétés du sol et du relief (De Cáceres et al., 2015). Afin de saisir la liste complète des espèces d'une communauté, la taille des parcelles est généralement entre 25 m<sup>2</sup> et 400 m<sup>2</sup>.
3. Les méthodes de recherche sur le terrain pour la réalisation des descriptions des écosystèmes sont bien décrites dans le manuel élaboré pour la BCBC (BC MoFR-MoE, 2010). Une version de ce manuel pour le Yukon est en cours d'élaboration, et POLAIRE travaille à l'élaboration d'une version de ce manuel pour l'Arctique-Subarctique. Les observations générales suivantes sont effectuées sur chacune des parcelles échantillonnées :
  - a. Évaluation du pourcentage de couverture par des strates de hauteur prédéfinie de tous les végétaux vasculaires et non vasculaires poussant sur le substrat prédominant du sol. Tous les végétaux doivent être associés à une espèce et des spécimens justificatifs doivent être recueillis selon les exigences pour la confirmation taxonomique (processus de relevé).
  - b. Décrire les propriétés du sol telles que la structure et la classification de l'humus, les strates pédonales du sol, les textures minérales et organiques du sol, la profondeur et la couleur du sol, et les principaux processus du sol tels que la marbrure, la gleyification et la cryoturbation. Attribuer la bonne classification des sols selon le système canadien de classification des sols (groupe de travail sur la classification des sols, 1998).
  - c. Décrire les caractéristiques du site telles que l'altitude, l'aspect, l'angle et la position de la pente, ainsi que le relief, les matériaux superficiels et la profondeur de la couche active jusqu'au pergélisol.

Lorsqu'une utilisation précise de la carte et de l'inventaire est prévue, des spécialistes supplémentaires peuvent faire partie de l'équipe de cartographie. Par exemple, si l'utilisation concerne l'habitat du caribou, un spécialiste des caribous peut accompagner l'équipe

et évaluer les différents écosystèmes pour déterminer s'ils conviennent comme habitat du caribou. De même, des spécialistes des applications d'ingénierie peuvent vouloir accompagner les équipes pour évaluer les écosystèmes afin de trouver des sources de gravier pour la construction de routes ou la circulation saisonnière pour l'exploration minière.

Aux fins du système CASBEC, les données de terrain sont recueillies sur des formulaires de terrain normalisés adaptés de la BCBC FS882 aux conditions arctiques et subarctiques. Des approches de saisie numérique sont actuellement à l'étude pour faciliter la saisie et la gestion des données. Dans le cadre du processus de sécurité des données, à la fin de la description de l'écosystème de chaque parcelle, des images numériques de tous les formulaires de terrain sont prises sur le terrain. Cela comprend également la prise de photos de la parcelle avec des angles de vue obliques et panoramiques, ainsi que des photos du profil du sol, de l'emplacement du site et de tout autre facteur d'intérêt sur le site. Toutes les données des parcelles sont saisies dans le logiciel VPRO (MacKenzie et Klassen, 2009) pour être synthétisées, analysées et tabulées.

## Des données de terrain au système CASBEC

### Classification de la végétation

Pour générer des unités d'association de plantes, le système CASBEC utilise des méthodes de classification<sup>2</sup> de la végétation. Instaurées par Braun-Blanquet (1932, 1951, 1964), ces méthodes ont été modifiées, comme indiqué dans Pojar et al. (1987), De Cáceres et al. (2015), et MacKenzie et Meidinger (2017). L'objectif est de regrouper les relevés comportant des communautés végétales similaires en unités de classification définies par une combinaison diagnostique d'espèces (CDS) qui les différencient de la CDS des autres unités.

L'unité d'association des végétaux est une unité de travail fondamentale. Elle peut être généralisée à des niveaux fonctionnels plus larges basés sur la similarité floristique, ou sur des facteurs fonctionnels/spatiaux par une combinaison de la floristique, de la dominance, de la physionomie de la végétation et de la biogéographie comme l'appliquent l'USNVC (2016), Jennings et al. (2004, 2009), ou à des niveaux supérieurs

de la composante site du système CASBEC. De cette façon, des classifications d'associations végétales géographiquement limitées sont établies pour les zones d'étude locales. Dans le but de créer une classification nationale cohérente à travers les biomes arctiques et subarctiques canadiens, le système CASBEC analyse et fusionne les unités locales de classification de la végétation basées sur des projets et provenant de différentes zones géographiques. Grâce à un processus de corrélation, le système CASBEC compare la combinaison diagnostique des espèces entre les unités d'association locales disponibles et identifie les unités de classification équivalentes ou divergentes.

### Classification biogéoclimatique et écosystèmes zonaux

Pour classer et établir la portée géographique des sous-zones biogéoclimatiques à l'échelle régionale à une échelle maximale de 1/250 000 (voir figure 1), le système CASBEC utilise le concept de zone. Le concept de zone<sup>3</sup> a été appliqué avec succès en Colombie-Britannique (Pojar et al., 1987) et dans d'autres régions du Canada et de l'Arctique, par exemple, par le groupe de travail sur les écorégions (1989), Saucier et al. (1998), l'équipe du CAVM (2003), Gould et al. (2003), Jorgenson et Meidinger (2015), et Baldwin et al. (2019).

Les sites zonaux sont des sites écologiquement « normaux » présentant des caractéristiques définies, comme le fait d'être situés sur des pentes modérées et d'aspect neutre, et d'avoir des sols bien drainés d'une certaine profondeur moyenne minimale (environ 60 cm) avec une texture argileuse et une faible teneur en fragments grossiers (< 25 %). Les communautés végétales matures qui se trouvent sur les sites zonaux sont supposées refléter au mieux le potentiel écologique des climats régionaux et définir l'écosystème zonal (Pojar et al., 1987 ; Groupe de travail sur les écorégions, 1989 ; CAVM Team, 2003). Les changements dans la distribution des écosystèmes zonaux à travers l'Arctique et le Subarctique sont utilisés pour caractériser et cartographier les sous-zones biogéoclimatiques.

Le concept des unités biogéoclimatiques est lié aux cartes de la végétation arctique circumpolaire (Circumpolar Arctic Vegetation Maps, CAVM Team 2003), mais à une échelle plus fine. Ces unités enregistrent la

<sup>2</sup> Pour plus de détails sur la classification de la végétation et les méthodes de classement en général, voir Shimwell (1971) et Ellenberg (1988).

variabilité notamment de la zonalité de l'altitude, se concentrent davantage sur la composition en espèces de l'écosystème zonal plutôt que sur les différences physiologiques et recoupent les informations que les CAVM séparent en sous-zone et en province floristique dans l'unique composante biogéoclimatique du système CASBEC.

### Classification des écosites et équivalence écologique

Dans le système CASBEC, les taxons de sites écologiques classés ou « écosites » décrivent les zones du paysage où la somme totale des facteurs environnementaux qui interagissent pour déterminer la composition, la structure et la productivité de la végétation sont considérés comme écologiquement équivalents, comme le démontre et l'exprime l'occurrence des mêmes communautés végétales à transition tardive. Les écosites décrivent la gamme des conditions environnementales au sein d'une sous-zone biogéoclimatique (c'est-à-dire au sein du même biogéoclimat régional) et soutiennent la même association ou sous-association de végétaux matures (séries et types d'écosites – voir la figure 1). Les gradients dominants qui différencient les écosites sont utilisées pour simplifier et organiser la complexité environnementale créée par la variabilité physiographique à travers le paysage. Les gradients arctiques et subarctiques les plus courants au sein d'une unité biogéoclimatique sont l'humidité relative du sol et le régime nutritif, ainsi que le degré de protection contre la neige en hiver. Cette simplification des principales conditions écologiques du site peut être exprimée sur une grille édaphotopique (Figure 2) pour différencier l'espace environnemental des séries d'écosites qui se trouvent dans une sous-zone biogéoclimatique.

## Les produits du système CASBEC

### Cartes régionales des sous-zones et des zones biogéoclimatiques

Cartes régionales des sous-zones et des zones biogéoclimatiques Les cartes biogéoclimatiques sont élaborées pour délimiter des régions climatiques écologiquement équivalentes (zones et sous-zones biogéoclimatiques) qui fournissent des unités climatiques régionales en fonction desquelles des séries d'écosites locaux et des types d'écosites sont définis et décrits. Des exemples de cartes biogéoclimatiques de la Colombie-Britannique peuvent être trouvés en ligne à l'adresse <https://www.for.gov.bc.ca/hre/becweb/resources/maps/>.

En plus de l'identification de l'écosystème zonal dans le cadre du processus de classification, des études de terrain et des relevés aériens sont réalisés pour documenter les changements de l'écosystème zonal à travers les gradients climatiques d'altitude ou de latitude. Comme la diversité floristique diminue avec l'augmentation de la latitude dans l'Extrême-Arctique,

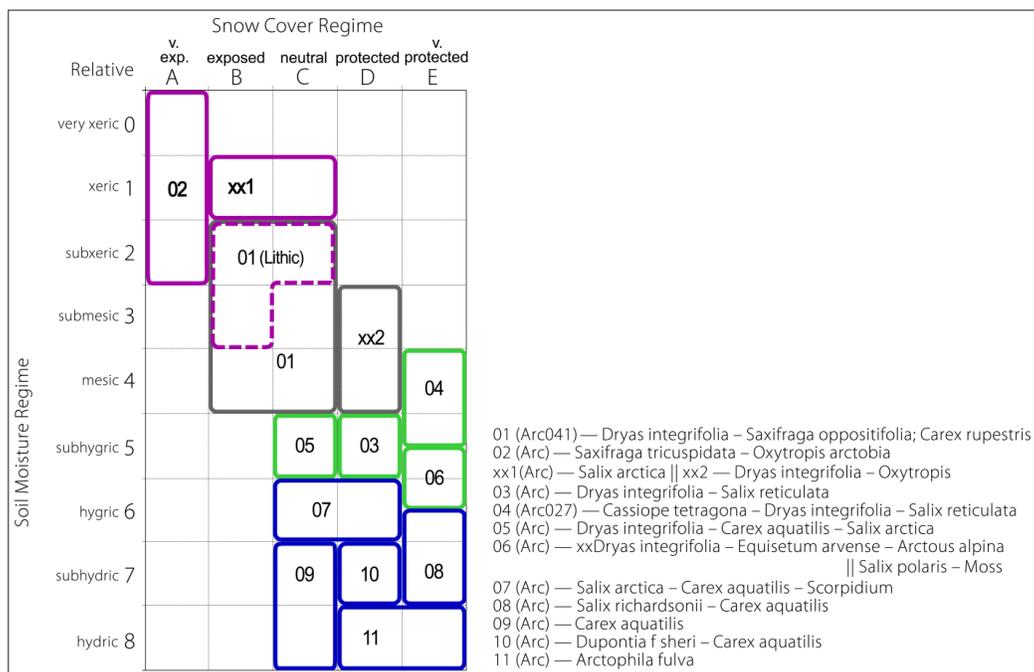


Figure 2 : Projet de grille édaphotopique développée pour la zone expérimentale de référence de la SCREA dans le sud-est de l'île Victoria (CAVM Zone D). Représentation des positions relatives de 11 séries d'écosites dans une grille chionoédaphique à deux axes (humidité du sol et protection de la neige).

<sup>3</sup> Les lignes directrices de la classification écologique des terres du Yukon utilise le terme « sites de référence » pour décrire ce concept (Ministère de l'Environnement du Yukon, 2016).

la disparition ou l'apparition de communautés d'arbustes bas, ou d'arbres sur les sites azonaux, deviennent des preuves supplémentaires importantes pour la cartographie des frontières biogéoclimatiques.<sup>4</sup> Les limites zonales/sous-zonales sont souvent complétées à l'aide de limites d'élévation ou de latitude généralisées pour en extrapoler les limites. Un autre élément à prendre en compte est l'effet déterminant que la géologie du socle rocheux peut avoir sur la distribution des végétaux, en particulier dans les zones calcaires communes de l'Arctique canadien. Dans ces cas, deux grilles édaphotopiques différentes sont nécessaires pour le même biogéoclimat régional.<sup>5</sup> Dans le contexte régional et biogéoclimatique des cartes biogéoclimatiques, c'est-à-dire qui comportent des sous-

zones biogéoclimatiques, l'un des produits les plus utiles et les plus courants du système CASBEC sont les cartes à l'échelle locale des séries et types d'écosites. La création des cartes des séries et des types d'écosites et leurs applications son abordées plus en détail ci-après.

### Guides d'excursion des écosites

Des guides d'excursion servant au repérage des écosites par unité biogéoclimatique sont couramment produits pour permettre une utilisation fonctionnelle de la classification. Le contenu et la présentation des guides d'excursion sont bien conçus pour la BCBE et nous proposons d'utiliser la même approche pour les guides d'excursion du CASBEC. Des guides

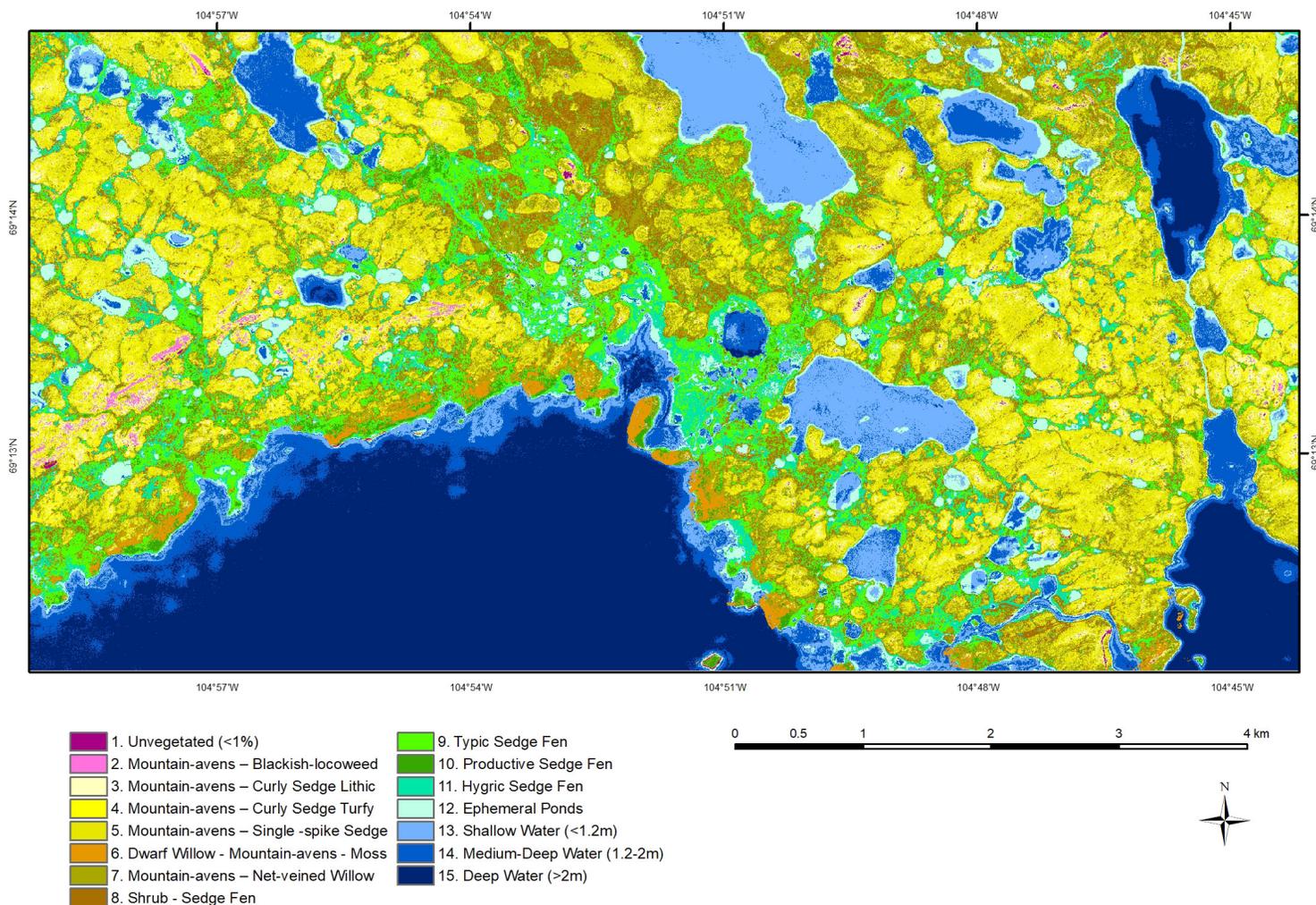


Figure 3 : Cartographie haute résolution (50 cm World View2) des séries d'écosites dans la zone de surveillance intensive de la Station canadienne de recherche dans l'Extrême-Arctique, près de Cambridge Bay, au Nunavut. Pour la préparation des cartes et les interprétations des écosystèmes, voir Ponomarenko et al. (2019).

<sup>4</sup> Pour une description détaillée des méthodes utilisées pour la cartographie des sous-zones biogéoclimatiques en Colombie-Britannique, voir le Ministry of Forests, Lands, Natural Resource Operations and Rural Development et le Ministry of Environment de la Colombie-Britannique (BC MoFR-MoE, 2010).

<sup>5</sup> Pour la cartographie des écosystèmes régionaux au Québec, voir les liens sous Ressources naturelles du Québec (consultés en mars 2019).

d'excursion sont disponibles pour toutes les sous-zones biogéoclimatiques de la Colombie-Britannique et peuvent être consultés à l'adresse <https://www.for.gov.bc.ca/hre/becweb/resources/classificationreports/subzones/index.html>.

Chaque guide de terrain renferme généralement des informations générales sur la théorie du système CASBEC, des informations sur la manière d'utiliser le guide et un aperçu environnemental de la sous-zone. La présentation comprend généralement les normes climatiques, la physiographie et la géologie du socle rocheux, la géologie de surface, les sols, le pergélisol et la description de la végétation. Le contenu principal des guides d'excursion fournit une description des séries d'écosites, y compris les principales caractéristiques du site, du sol et de la végétation, ainsi que certaines interprétations de la gestion et de l'utilisation de la faune, si elles sont disponibles. Afin de répondre aux besoins locaux de gestion ciblée des interprétations, les types d'écosites peuvent également être décrits dans chaque série de sites. Les annexes du guide d'excursion comprennent généralement les principaux renseignements sur l'humidité du sol et son régime nutritif, les renseignements principaux sur la texturation du sol, une liste des végétaux vasculaires et non vasculaires, des tableaux récapitulatifs de la végétation pour les séries d'écosites ainsi qu'une classification et une description des formes d'humus du sol.

Pour faciliter la classification et la cartographie des écosystèmes terrestres arctiques et subarctiques, des guides d'excursion sont en cours d'élaboration pour les régions méridionales et arctiques du Yukon à l'adresse <https://yukon.ca/fr/ecological-landscape-classification#en-quoi-consiste-la-classification-%C3%A9cologique-des-terres-cet-> (MacKenzie et al., 2018). Un rapport sur la cartographie de l'écosystème du parc national Wapusk (Ponomarenko et al., 2014) renferme des renseignements semblables à ceux trouvés dans les guides d'excursion de la BCBE. Le personnel de POLAIRE a commencé à travailler à l'élaboration de guides d'excursion pour les sous-zones E et D du CAVM dans la zone expérimentale et de référence du SCREA dans la région de Kitikmeot, au Nunavut.

## Utilisation du système CASBEC

Les renseignements et les produits tirés de la classification et de la cartographie des écosystèmes

terrestres sont des outils qui peuvent être utilisés à de nombreuses fins de recherche, de surveillance et de gestion de l'utilisation des terres, comme en témoigne le grand nombre d'utilisations du BCBE en Colombie-Britannique depuis 1975 (MacKinnon et al., 1992). Une analyse détaillée des utilités du système CASBEC dépasse le cadre du présent article, mais quelques exemples de l'Arctique sont présentés ici.

En utilisant l'approche CASBEC, des cartes d'écosites ont été créées principalement à partir de données de télédétection optique, et d'autres variables du paysage dérivées. Par exemple, la position, l'élévation et l'aspect des pentes, à différentes échelles, ont été utilisés avec l'imagerie optique pour élaborer des inventaires de conservation, une cartographie des habitats, la planification des zones protégées dans les parcs nationaux du nord du Canada (Fraser et al., 2012 ; McLennan, 2012a, 2012b ; Ponomarenko, 2014) et à des fins de développement industriel (Groupe Hémisphères, 2009). Des approches connexes sont maintenant largement utilisées comme éléments de base du développement nordique (Groupe Hémisphères, 2009 ; Groupe Hémisphères, 2014), et pour la cartographie et l'interprétation de la géologie de surface et des caractéristiques du pergélisol (Zhang et al., 2012, 2013 ; Cable et al., 2016 ; McKillop et Sacco, 2017).

D'un point de vue de recherche, les unités du système CASBEC fournissent des valeurs essentielles pour la stratification dans la conception des études, pour l'extrapolation des résultats à de nouvelles zones, et pour la coordination et la comparaison des recherches sur les écosystèmes terrestres à long terme et des expériences de surveillance dans et entre les zones d'étude (Figure 3 ; McLennan et al., 2018). Les unités du système CASBEC sont actuellement utilisées pour la conception et la mise en œuvre d'expériences de surveillance des écosystèmes à long terme sur le campus de la SCREA près de Cambridge Bay, au Nunavut (McLennan et al., 2018).

L'extrapolation du climat des surfaces (Hutchinson, 1991 ; Daly et al., 2002 ; Wang et al., 2012a ; McKenney et al., 2013) a permis de définir les dimensions climatiques de régions climatiques écologiquement équivalentes, puis de les appliquer dans la modélisation du changement climatique dans plusieurs territoires (Hamann et Wang, 2006 ; Wang et al., 2012b). Avec une délimitation précise des sous-zones biogéoclimatiques arctiques et subarctiques, ces mêmes techniques

peuvent être utilisées pour aider à prévoir les changements futurs de la composition et de la structure des écosystèmes terrestres arctiques et subarctiques.

## Sommaire et analyse

Les concepts du système CASBEC, comme les écosystèmes zonaux et l'équivalence écologique, utilisent les communautés végétales comme phytomètres pour distinguer les sous-zones biogéoclimatiques régionales et les séries locales d'écocites. Ces concepts clés supposent l'évolution des écosystèmes dans des conditions de stabilité et d'équilibre climatiques relatifs et sont soutenus par la stabilité estimée des lignées d'arbres nord-américaines et eurasiennes datant de 3 000 à 4 000 ans (Lavoie et Payette, 1996 ; MacDonald et al., 2000 ; Payette, 2006). Cette constance climatique a contribué à créer les modèles distinctifs de la physiologie de la végétation et de sa floristique que nous voyons aujourd'hui dans l'Arctique canadien (Edlund et Alt, 1989 ; CAVM Team, 2003 ; Gould et al., 2003). Il est clair maintenant que cet équilibre change rapidement, et que les communautés végétales arctiques et subarctiques évoluent en conséquence (Elmendorf et al., 2012 a, 2014 ; Pearson et al., 2013). Comme l'explique Haeussler (2011), les approches biogéoclimatiques sont déjà globales et multiscalaires. Pour être pertinent en termes de changement des écosystèmes dû au climat, le système CASBEC devra adopter des concepts comme les processus non linéaires et non équilibrés mis de l'avant par le domaine en pleine évolution de la science de la complexité des écosystèmes (Manson, 2001 ; Bar Yam, 2003). Cela peut être réalisé en adaptant des techniques nouvelles et dynamiques, comme les paysages adaptatifs (Kauffman, 1995 ; Gavrillets, 2004) et la modélisation basée sur des agents (Gilbert et Terna, 2000 ; Bonabeau, 2002), pour comprendre et prévoir les changements des écosystèmes dans un monde en rapide évolution.

Le présent article décrit la nécessité d'une approche normalisée et utile pour décrire, classer et cartographier les écosystèmes terrestres dans les biomes arctiques et subarctiques canadiens. Le système CASBEC adopte la théorie, l'approche et les méthodes employées par le système de la BCBE, très performant et éprouvé. Ce système s'est révélé être un outil très utile pour les applications de gestion des terres et constitue un cadre

de recherche essentiel en Colombie-Britannique. Un examen officiel et indépendant (Vis-à-vis Management Resources, 2005) a déclaré que la BCBE a entraîné des « centaines de millions de dollars » d'avantages économiques pour la province de la Colombie-Britannique. Bien que les avantages économiques relatifs aux utilisations pour l'industrie forestière ne soient pas appropriés pour les écosystèmes du Nord, certains autres avantages demeurent pertinents, comme la création d'une « infrastructure d'information en langage commun » utilisée par les chercheurs et les gestionnaires des terres, une réduction significative des coûts de formation, et la crédibilité des communications de recherche et des décisions de gestion des terres basée sur l'acceptation générale des produits de la BCBE.

De même, la vaste adoption du système CASBEC par la communauté nordique de la recherche et de la gestion des terres permettrait de créer un langage commun pour la recherche, la surveillance et la gestion des écosystèmes arctiques et subarctiques. Pour ce faire, il faudrait relier et extrapoler les activités régionales aux activités nationales de recherche et de surveillance, et rationaliser les conséquences écologiques potentielles et les stratégies d'atténuation des développements dans le Nord. Enfin, un système normalisé simplifierait la formation et permettrait de créer des cours de formation sur le CASBEC dans les collèges du Nord, ou au moyen de programmes comme le Nunavut Environmental Technician Program.

Le présent article est destiné à la communauté canadienne des chercheurs et des praticiens consultants en écosystèmes terrestres du Nord. Il propose la mise en œuvre du système CASBEC pour normaliser la classification et la cartographie des communautés écologiques terrestres dans les paysages arctiques et subarctiques du Canada. Le système CASBEC en est actuellement à ses débuts et il reste beaucoup à faire pour le rendre aussi pratique et utile que le système BCBE de la Colombie-Britannique. La première étape de ce processus est de parvenir à un accord avec la communauté scientifique travaillant sur la végétation du Nord. Cet article sera largement diffusé et, si l'intérêt est suffisant, un atelier sera organisé pour discuter des détails du système CASBEC et des étapes nécessaires à son adoption comme méthode normalisée pour la recherche, la surveillance et l'utilisation des terres dans le Nord.

La communauté canadienne des chercheurs et des praticiens consultants en écosystèmes terrestres du Nord est invitée à travailler en collaboration pour mettre en œuvre le système CASBEC. L'intérêt, la contribution et le soutien à l'uniformisation amélioreront considérablement la coordination, la portée et l'incidence des nombreuses utilisations du système dans les domaines de la recherche, de la surveillance et de la conservation dans le Nord.

## Considérations d'ordre communautaire

Une classification et une cartographie normalisées et opérationnelles des écosystèmes régionaux et locaux profiteront aux communautés du Nord de la même manière qu'elles peuvent profiter à la recherche, à la surveillance et à la gestion des terres dans le Nord, en fournissant un modèle d'écosystème global, intégratif et utile pour comprendre les changements de l'écosystème dans le contexte socio-écologique des besoins de la communauté. L'approche globale utilisée par le système CASBEC, où le paysage est considéré comme un système complexe et interactif constitué d'interactions abiotiques et biotiques, est semblable à la vision globale du monde qui caractérise le savoir autochtone (Berkes, 2008, 2009). Ce système peut être utilisé dans le cadre d'une approche de cogénération de connaissances pour traiter des questions communautaires comme la compréhension de l'évolution des habitats des espèces vitales pour l'alimentation locale (Jones et al., 2019).

À mesure que le système CASBEC sera perfectionné dans le Nord, il sera possible pour les membres des communautés ayant reçu une formation technique d'utiliser le système pour répondre aux besoins de leur communauté locale. En témoigne la longue histoire de la formation technique et de l'application du système BCBECE en Colombie-Britannique. Une fois qu'un projet de classification des écosystèmes locaux a été élaboré pour une sous-zone biogéoclimatique, les utilisateurs communautaires de niveau technique pourront être formés à l'utilisation des clés et autres outils des écosystèmes, ou utiliser les ébauches de guides d'excursions, s'ils sont accessibles. Ces utilisateurs communautaires pourront identifier et interpréter les unités de l'écosystème et utiliser la classification pour des questions qui répondent aux besoins immédiats de leurs communautés.

## Remerciements

Les auteurs tiennent à souligner le travail de pionnier de Vladimir Krajina et de ses nombreux étudiants, qui ont conceptualisé et développé les principes des écosystèmes biogéoclimatiques en Colombie-Britannique. Nous souhaitons plus particulièrement souligner les travaux de recherche et le leadership de Dr Karel Klinka et de Dr Jim Pojar, qui ont travaillé à rendre le système BCEBC fonctionnel, qui ont encadré de nombreux étudiants et praticiens et qui ont travaillé à quantifier et à valider de nombreuses catégories qualitatives générées par le processus biogéoclimatique.

## Références

- Baldwin, K., Allen, L., Basquill, S., Downing, D., Flynn, N., MacKenzie, W., Major, M., Meades, W., Meidinger, D., Morneau, C., Saucier, J.-P., Thorpe, J., Uhlig, P. 2019. Vegetation Zones of Canada: a biogeoclimatic perspective. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service: Sault Ste. Marie, Ontario.
- Barrett, P.E. 1972. Phytogeocoenoses of a coastal lowland ecosystem, Devon Island, N.W.T. PhD thesis, Department of Botany, The University of British Columbia. Accessed September 12, 2016. <https://open.library.ubc.ca/cIRcle/collections/ubctheses/831/items/1.0101177>.
- Bar-Yam, Y. 2003. Dynamics of complex systems. Studies in nonlinearity. Westview Press: Boulder, California.
- BC MoFR-MoE. 2010. Field Manual for Describing Terrestrial Ecosystems – 2nd edition. B.C. Ministry of Forests and Range (MoFR) and B.C. Ministry of Environment (MoE), Land Management Handbook No. 25. Crown Publications: Victoria, British Columbia.
- Berkes, F. 2008. Sacred ecology – 2nd edition. Routledge: New York, New York.
- Berkes, F., Berkes, M.K. 2009. Ecological complexity, fuzzy logic and holism in indigenous knowledge. *Futures*, 41(1):6–12. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.futures.2008.07.003>.

- Bonabeau, E. 2002. Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the U.S.A.*, 99(S3):7280–7287. doi:10.1073/pnas.082080899. PMID:12011407.
- Braun-Blanquet, J. 1932. *Plant Sociology: the study of plant communities*. Hafner: New York, New York.
- Braun-Blanquet, J. 1951. *Pflanzensoziologie: Grundzüge de Vegetationskunde – 2nd edition*. Springer-Verlag: Vienna, Austria.
- Braun-Blanquet, J. 1964. *Pflanzensoziologie: Grundzüge der Vegetationskunde – 3rd edition*. Springer-Verlag: Vienna, Austria.
- Cable, W.L., Romanovsky, V.E., Jorgenson, M.T. 2016. Scaling-up permafrost thermal measurements in western Alaska using an ecotype approach. *The Cryosphere*, 10(5):2517–2532. Retrieved from: <http://dx.doi.org/10.5194/tc-10-2517-2016>.
- CAVM Team. 2003. *Circumpolar Arctic Vegetation Map. Conservation of Arctic Flora and Fauna Map No. 1*. U.S. Fish and Wildlife Service: Anchorage, Alaska. ISBN: 0-9767525-0-6
- CNVC. No date. *The Canadian National Vegetation Classification*. Accessed March 2019. <http://cnvc-cnvc.ca/>.
- Clements, F.E. 1916. *Plant Succession: An Analysis of the Development of Vegetation*. Carnegie Institution of Washington Publication: Washington, DC.
- Clements, F.E. 1936. Nature and Structure of the Climax. *Journal of Ecology*, 24(1):252–284.
- Daly, C., Gibson, W.P., Taylor, G.H., Johnson, G.L., Pasteris, P. 2002. A knowledge-based approach to the statistical mapping of climate. *Climate Research*, 22(2):99–113.
- De Cáceres, M., Chytry, M., Agrillo, E., Attorre, F., Botta-Dukat, Z., Capelo, J., Czucz, B., Dengler, J., Ewald, J., Wiser, S.K. 2015. A comparative framework for broad-scale plot-based vegetation classification.
- Ecoregions Working Group. 1989. *Ecoclimatic Regions of Canada: first approximation*. Ecoregions Working Group, Canada Committee on Ecological Land Classification. Ecological Land Classification Series, No. 23. Sustainable Development Branch, Canadian Wildlife Service: Ottawa, Ontario. ISBN 06621656590662165659.
- Edlund, S.A., Alt, B.T. 1989. Regional congruence of vegetation and summer climate patterns in the Queen Elizabeth Islands, Northwest Territories, Canada. *Arctic*, 42(1):3–23.
- Ellenberg, H. 1988. *Vegetation ecology of Central Europe – 4th edition*. Cambridge 2884 University Press: Cambridge, Massachusetts
- Elmendorf, S.C., Henry, G.H.G., Hollister, R.D., Björk, R.G., Boulanger-Lapointe, N., Cooper, E.J., Cornelissen, J.H.C., et al., 2012. Plot-scale evidence of tundra vegetation change and links to recent summer warming. *Nature Climate Change*, 2(6):453–457.
- Elmendorf, S. C., Henry, G.H.R., Hollister, R.D., Fosaa, A.M., Gould, W.A., Hermanutz, L., Hofgaard, A., Jónsdóttir, I.S., Jorgenson, J.C., Lévesque, E., Magnusson, B., Molau, U., Myers-Smith, I.H., Oberbauer, S.F., Rixen, C., Tweedie, C.E., Walker, M.D. 2014. Experiment, monitoring, and gradient methods used to infer climate change effects on plant communities yield consistent patterns. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the U.S.A.*, 112(2):448–452.
- Environment Yukon. 2016. *Yukon Ecological and Landscape Classification Guidelines Version 1.0*. Edited by N. Flynn and S. Francis. Department of Environment, Policy, Planning & Aboriginal Relations Branch, ELC Program. Government of Yukon: Whitehorse, Yukon.
- Fraser, R., McLennan, D.S., Ponomarenko, S., Olthof, I. 2012. Image-based predictive ecosystem mapping in Canada's Arctic parks. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 14(NA):129–138.
- Gavrilets, S. 2004. *Fitness landscapes and the origin of species*. Princeton University Press: Princeton, New Jersey.

- Gilbert, N., Terna, P. 2000. How to build and use agent-based models in social science. *Mind and Society*, 1(1):57–72. doi:10.1007/BF02512229.
- Gould, W.A., Walker, D.A., Biesboer, D. 2003. Combining research and education: Terrestrial zonation across a Canadian Arctic transect. *Arctic*, 56(1):45–54.
- Groupe Hémisphères. 2009. Mapping of terrestrial ecosystems and surface deposits: Direct Shipping Ore Project. Technical report. Produced on behalf of New Millennium Capital Corp.
- Groupe Hémisphères. 2014. Terrestrial ecosystem mapping, Howse pit study area. Technical report. Submitted to Howse Minerals Limited.
- Haeussler, S. 2011. Rethinking biogeoclimatic ecosystem classification for a changing world. *Environmental Reviews*, 19(NA):254–277.
- Hamann, A., Wang, T. 2006. Potential effects of climate change on ecosystem and tree species distribution in British Columbia. *Ecology*, 87(11):2773–2786. doi:10.1890/0012-9658(2006)87[2773:PEOCCO]2.0.CO;2. PMID: 17168022.
- Hutchinson, M.F. 1991. The application of thin plate smoothing splines to continent - wide data assimilation. BMRC Research Report 27. Bureau of Meteorology: Melbourne, Victoria.
- Jennings, M., Faber-Langendoen, D., Peet, R., Loucks, O., Glenn-Lewin, D., Damman, A., Barbour, M., Pfister, R., Grossman, D., Roberts, D., Tart, D., Walker, M., Talbot, S., Walker, J., Hartshorn, G., Waggoner, G., Abrams, M., Hill, A., Rejmanek, M. 2004. Guidelines for Describing Associations and Alliances of the U.S. National Vegetation Classification. The Ecological Society of America Vegetation Classification Panel. Version 4. Retrieved from: [http://vegbank.org/vegdocs/panel/NVC\\_guidelines\\_v4.pdf](http://vegbank.org/vegdocs/panel/NVC_guidelines_v4.pdf).
- Jennings, M. D., Faber-Langendoen, D., Loucks, O.L., Peet, R.K., Roberts, D. 2009. Standards for associations and alliances of the U.S. National Vegetation Classification. *Ecological Monographs*, 79(2):173–199.
- Jenny, H. 1941. *Factors of Soil Formation*. McGraw-Hill Book Co.: New York, New York.
- Jones, T., McLennan, D., Behe, C., Arvnes, M., Wesseberg, S., Sergienko, L., Harris, C., Harcharek, Q. 2019. Arctic Coastal Biodiversity Monitoring Plan. Conservation of Arctic Flora and Fauna International Secretariat: Akureyri, Iceland. 978-9935-431-76-9.
- Jorgensen, T., Meidinger, D. 2015. The Alaska Yukon Region of the Circumboreal Vegetation Map (CBVM). Conservation of Arctic Flora and Fauna (CAFF) Strategies Series Report. Conservation of Arctic Flora and Fauna International Secretariat: Akureyri, Iceland. ISBN: 978-9935-431-48-6.
- Kauffman, S.A. 1995. *At home in the universe: The search for laws of self-organization and complexity*. Oxford University Press: New York, New York.
- Krajina, V.J. 1960. Can we find a common platform for the different schools of forest type classification? *Silva Fennica*, 105(NA):50–55.
- Lambert, J.D. 1968. The ecology and successional trends of tundra plant communities in the low arctic subalpine zone of the Richardson and British mountains of the Canadian western arctic. PhD thesis, Department of Botany, The University of British Columbia. Accessed September 12, 2016. <https://open.library.ubc.ca/cIRcle/collections/ubctheses/831/items/1.0104598>.
- Lavoie, C., Payette, S. 1996. The long-term stability of the boreal forest limit in Subarctic Quebec. *Ecology*, 77(4):1226–1233.
- MacDonald, G.M., Velichko, A.A., Kremenetski, C.V., Borisova, O.K., Goleva, A.A., Andreev, L.C., Riding, R.T., Forman, S.L., Edwards, T.W.D., Aravena, R., Hammarlund, D. 2000. Holocene treeline history and climate change across northern Eurasia. *Quaternary Research*, 53(NA):302–311. doi:10.1006/qres.1999.2123.
- MacKenzie, W.H., Klassen, R. 2009. VPro User Guide 13. B.C. Ministry of Forests and Range, Research Branch: Victoria, B.C.
- MacKenzie, W.H., Meidinger, D. 2017. The Biogeoclimatic Ecosystem Classification Approach: an ecological framework for vegetation classification. *Phytocoenologiao, Special Issue Classification Approaches*, 48(2):203–213. doi:213doi10.1127/phyto/2017/0160.

- MacKenzie, W. H., Kennedy, C.E., Flynn, N. 2018. Ecosystems of the Yukon Arctic Region: a guide to identification. Department of Environment, Policy, Planning & Aboriginal Relations Branch, ELC Program. Government of Yukon: Whitehorse, Yukon.
- MacKinnon, A., Meidinger, D., Klinka, K. 1992. Use of the biogeoclimatic ecosystem classification in British Columbia. *Forestry Chronicle*, 68(1):100–120.
- Major, J. 1951. A functional, factorial approach to plant ecology. *Ecology*, 32(3):392–412.
- Manson, S. 2001. Simplifying complexity: a review of complexity theory. *Geoforum*, 32(3):405–414. doi:10.1016/S0016-7185(00) 00035-X.
- McKenney D., Pedlar, J., Hutchinson, M., Papadopol, P., Lawrence, K., Campbell, K., Milewska, E., Hopkinson, R.F., Price, D. 2013. Spatial climate models for Canada's forestry community. *Forestry Chronicle*, 89(5):659–663.
- McKillop, R.J., Sacco, DD.A. 2017. Predictive Mapping of Permafrost Thaw Settlement Hazard Near Lac de Gras, Northwest Territories. Abstract, 2017. Yellowknife Geoscience Forum.
- McLennan, D.S., Bell, T., Berteaux, D., Chen, W., Copland, L., Fraser, R., Gallant, D., Gauthier, G., Hik, D., Krebs, C.J., Myers-Smith, I.H., Olthof, I., Reid, D., Sladen, W., Tarnocai, C., Vincent, W.F., Zhang, Y. 2012a. Recent climate-related terrestrial biodiversity research in Canada's Arctic national parks: review, summary, and management implications. *Biodiversity*, 13(3-4):157–173.
- McLennan, D.S. 2012b. "Dealing with uncertainty: Managing and monitoring Canada's northern national parks in a rapidly changing world", in *Ecological Consequences of Climate Change – Mechanisms, Conservation, and Management*, ed. E.A. Beever and J.L. Belant. CRC Press, Taylor and Francis Group: Boca Raton, Florida, 209–233.
- McLennan, D.S., MacKenzie, W.H., and Meidinger, D., Wagner, J., Arko, C. 2018. A standardized ecosystem classification for the coordination and design of long-term monitoring in the Arctic-Subarctic Biomes. *Arctic, Supplement 1*, 71(5):1–15.
- Payette, S. 2006. Contrasted dynamics of northern Labrador tree lines caused by climate change and migrational lag. *Ecology*, 88(3):770–780.
- Pearson, R.G., Phillips, S.J., Loranty, M.M., Beck, P.S.A., Damoulas, T., Knight, S.J., Goetz, S.J. 2013. Shifts in Arctic vegetation and associated feedbacks under climate change. *Nature Climate Change*, 3(NA):673–677. doi: 10.1038/NCLIMATE1858.
- Pogrebnyak, P.S. 1929. Über die Methodik der Standortsuntersuchungen in Verbreitung mit Waldtypen [Research methodology for forest site types]. *Verh. II Int. Kongr. forstl. Versuchsanstalten [II International Congress of Forest Research Institute]*: Stockholm, Sweden.
- Pogrebnyak, P.S. 1955. *Osnovy lesnoj typologii [Foundations of forest typology]*. Academy of Sciences of the Ukrainian Soviet Socialist Republic: Kiev, Russia.
- Pojar, J., Klinka, K., Meidinger, D. 1987. Terrestrial ecosystem classification in British Columbia. *Forest Ecology and Management*, 22(NA):119–154.
- Ponomarenko, S., Quirouette, J., Sharma, R., McLennan, D.S. 2014. *Ecotype Mapping Report for Wapusk National Park. Monitoring and Ecological Information. Natural Resource Conservation. Parks Canada: Gatineau, Quebec.*
- Ressources naturelles Québec. 2003a. *The Ecological Land Classification Hierarchy*. Gouvernement du Québec. Accessed March 2019. <https://mffp.gouv.qc.ca/english/publications/forest/publications/ecological.pdf>.
- Ressources naturelles Québec. 2003b. *Vegetation Zones and Bioclimatic Domains in Québec*. Gouvernement du Québec. Accessed March 2019. <http://mern.gouv.qc.ca/english/publications/forest/publications/zone-a.pdf>.
- Saucier, J.-P., Bergeron, J.-F., Grondin, P., Robitaille, A. 1998. *The Land Regions of Southern Quebec (3rdrd version): One element in the Hierarchical Land Classification System developed by Québec Ministère des Ressources Naturelles du Quebec. Québec Ministère des Ressources Naturelles, L'Aubelle Supplement.*

Soil Classification Working Group. 1998. The Canadian system of soil classification – 3rd edition. Agriculture and Agri-Food Canada: Ottawa, Ontario.

Shimwell, D.W. 1971. Description and classification of vegetation. Sidgwick and Jackson: London.

Sukachev, V. 1960. The correlation between the concept 'forest ecosystem' and 'forest biogeocoenose' and their importance for the classification of forest. *Silva Fennica*, 103(NA):94–97.

Sukachev, V., Dylis, N. 1964. Fundamentals of Russian Biogeocoenology. Oliver and Boyd: London.

USNVC. 2016. The U.S. National Vegetation Classification. Accessed March 2019. <http://usnvc.org/>.

Vis-à-vis Management Resources. 2005. A review of the biogeoclimatic ecosystem classification program. Contract report. B.C. Ministry of Forests and Range: Victoria, B.C.

Vorobyov, D.V. 1953. Forest types of the European part of the USSR. Academy of Sciences of the Ukrainian Soviet Socialist Republic: Kiev, Ukraine.

Walker, D.A., Reynolds, M.K. 2011. An International Arctic Vegetation Database: A foundation for pan-Arctic biodiversity studies. Conservation of Arctic Flora and Fauna (CAFF) Strategies Series Report 5. CAFF: Akureyri, Iceland.

Walker, D.A., Alsos, I.G., Bay, C., Boulanger-Lapointe, N., Breen, A.L., Bültmann, H., Christensen, T., Damgaard, C., Daniëls, F.J.A., Hennekens, S., Reynolds, M.K., Le Roux, P.C., Luoto, M., Pellissier, L., Peet, R.K., Schmidt, N.M., Stewart, L., Virtanen, R., Yoccoz, N.G., Wisz, M.S. 2013. Rescuing Valuable Arctic Vegetation Data for Biodiversity Models, Ecosystem Models and a Pan-Arctic Vegetation Classification. *Arctic*, 66(1):133–138.

Wali, M.K. 1988. Reflections on the life, work, and times of Vladimir Joseph Krajina. *Canadian Journal of Botany*, 66(12):2605–2619.

Wang, T., Campbell, E.M., O'Neill, G.A., Aitken, S.N., 2012a. Projecting future distributions of ecosystem climate niches: Uncertainties and management applications. *Forest Ecology and Management*, 279(NA):128–140. Retrieved from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112712003118>.

Wang, T., Hamann, A., Spittlehouse, D., Murdock, T.N. 2012b. Climate WNA—High-resolution spatial climate data for western North America. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(1):16–29. Retrieved from: <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JAMC-D-11-043.1>.

Zhang, Y., Li, J., Wang, X., Chen, W., Sladen, W., Dyke, L., Dredge, L., Poitevin, J., McLennan, D., Stewart, H., Kowalchuk, S., Wu, W., Kershaw, G.P., Brook, R.K. 2012. Modelling and mapping permafrost at high spatial resolution in Wapusk National Park, Hudson Bay Lowlands. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 49(8):925–937. doi:10.1139/E2012-031.

Zhang, Y., Wang, X., Fraser, R., Olthof, I., Chen, W., McLennan, D., Ponomarenko, S., Wu, W. 2013. Modelling and mapping climate change impacts on permafrost at high spatial resolution for an Arctic region with complex terrain. *The Cryosphere*, 7(NA):1121–1137. doi:10.5194/tc-7-1121-2013. Retrieved from: [www.the-cryosphere.net/7/1121/2013/](http://www.the-cryosphere.net/7/1121/2013/).

# ÉCHANGE NET D'ÉCOSYSTÈME DANS LE PERGÉLISOL DE CAMBRIDGE BAY, AU NUNAVUT, CANADA

J. Yun<sup>1,2\*</sup>, M.J. Kwon<sup>1</sup>, J.Y. Jung<sup>1</sup>, N. Chae<sup>3</sup>, B.Y. Lee<sup>1</sup>, J. Yoo<sup>1</sup>, J. Wanger<sup>4</sup>, et T. Choi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Institut de recherche polaire de la Corée, Incheon, Corée du Sud

<sup>2</sup> Programme interdisciplinaire en météorologie agricole et forestière, Université nationale de Séoul, Séoul, Corée du Sud

<sup>3</sup> Institut des sciences de la vie et des ressources naturelles, Université de Corée, Séoul, Corée du Sud

<sup>4</sup> Savoir polaire Canada, Station canadienne de recherche dans l'Extrême-Arctique, Cambridge Bay, Nunavut, Canada

\* [juyeol@kopri.re.kr](mailto:juyeol@kopri.re.kr)

## Résumé

Il existe de grandes incertitudes quant à la compréhension du moment et de la magnitude de la rétroaction entre le carbone et le climat sur le pergélisol, notamment en raison du manque de mesures sur le terrain. Afin de mieux comprendre les mécanismes des processus d'échange et améliorer les modèles climatiques, il est important de surveiller en permanence les échanges de carbone à différents endroits du pergélisol dans l'Arctique. En 2012, un site d'étude a été créé à Cambridge Bay, au Nunavut (Canada), dans le cadre d'un projet de l'Institut coréen de recherche polaire (KOPRI) intitulé [Traduction] « Surveillance des changements environnementaux du pergélisol circum-Arctique, prévisions et futurs développements et techniques relatives aux biomatériaux utiles » (Circum-Arctic Permafrost Environment Change Monitoring, Future Prediction and development Techniques of useful biomaterials ou CAPEC). Le site d'étude est un emplacement de toundra sèche situé au-dessus du pergélisol. En 2012, un système de covariance de vents tourbillonnants a été mis en place sur ce site pour surveiller les échanges de carbone et d'énergie entre l'atmosphère et l'écosystème de la toundra.

Cet article présente les résultats préliminaires obtenus sur le site de l'étude en 2017. Le taux d'acquisition des données sur le flux de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) était de 44 % et celui des données météorologiques complémentaires (telles que le rayonnement, la température de l'air, etc.) était de 89 %. La plupart des données manquantes (ou de mauvaise qualité) ont été recueillies pendant l'hiver. Une méthode d'échantillonnage à distribution marginale a été utilisée pour combler les lacunes des données manquantes sur les flux de O<sub>2</sub>. À la mi-juin, le site a été totalement exposé à l'atmosphère et l'échange net des écosystèmes (ENE) est devenu négatif (c'est-à-dire qu'il s'agissait d'un piège à CO<sub>2</sub> atmosphérique). En juillet, l'ENE a augmenté jusqu'à un maximum de -2,8 grammes de carbone par mètre carré par jour (-2,8 gC/m<sup>2</sup>/jour). À la fin du mois de septembre, le site était partiellement recouvert de neige et l'ENE a diminué et fluctué autour de zéro. Les résultats préliminaires couvrent une période de cinq mois, de mai à septembre 2017. Au cours de cette période, l'ENE était de -100,2 gC/m<sup>2</sup>, la productivité primaire brute (la quantité de CO<sub>2</sub> absorbée par la végétation) était de 235,4 gC/m<sup>2</sup>, et la respiration de l'écosystème (la quantité de CO<sub>2</sub> respirée

Référence suggérée :

Yun, J., Kwon, M.J., Jung, J.Y., Chae, N., Lee, B.Y., Yoo, J., et Choi, T. 2019 : Échange net d'écosystème dans le pergélisol de Cambridge Bay, au Nunavut, Canada. *Aqhaliat* 2019, *Savoir polaire Canada*, p. 22-30. DOI: 10.35298/psc.2019.03

par la végétation et les micro-organismes dans les sols) était de 135,2 gC/m<sup>2</sup>. La respiration de l'écosystème, estimée en fonction des mesures recueillies en chambre en dehors de la saison de culture, était de 9,1 gC/m<sup>2</sup> et l'accumulation annuelle d'ENE était de -91,1 gC/m<sup>2</sup>. Ces résultats préliminaires indiquent qu'en 2017, le site de la toundra sèche a agi comme un piège à CO<sub>2</sub> atmosphérique. Toutefois, en raison de l'incertitude causée par le manque de données comblé sur l'ENE, en particulier pour les données de la saison hivernale 2017, il est prématuré de tirer une telle conclusion pour le moment.

## Introduction

La toundra arctique a accumulé une grande quantité de carbone (C) en raison des basses températures et de la disponibilité de l'eau (Schuur et al., 2015). En raison du réchauffement climatique et de sa rétroaction potentielle sur le climat, il y a un intérêt de plus en plus grand pour les variations des taux d'échange de carbone entre le pergélisol et l'atmosphère (McGuire et al., 2012). Il existe toutefois de grandes incertitudes quant à la compréhension du moment et de la magnitude de la rétroaction entre le carbone et le climat sur le pergélisol, en partie en raison d'un manque de mesures sur le terrain. Il est donc à la fois nécessaire et important de surveiller en permanence les échanges de carbone. La dynamique du carbone dans l'Arctique ne peut être comprise qu'en effectuant une surveillance à long terme et à différents endroits sur le pergélisol. Toutefois, les conditions environnementales difficiles comme les températures extrêmement basses ainsi que l'accessibilité et la disponibilité limitées de l'énergie rendent les observations continues difficiles dans les régions pergélisolées éloignées de l'Arctique (Goodrich et al., 2016). L'Institut coréen de recherche polaire (KOPRI) a établi des sites d'observation à long terme dans les régions circum-Arctiques afin de surveiller en permanence les changements environnementaux de l'Arctique et leurs répercussions sur le changement climatique. Ces sites comprennent divers types de toundra à travers l'Arctique, tels que la toundra humide et la toundra sèche ainsi que le désert polaire. Le projet de recherche KOPRI [Traduction] « Surveillance des changements environnementaux du pergélisol circum-Arctique, prévisions et futurs développements et techniques relatives aux biomatériaux utiles » (CAPEC) utilise un système de flux à covariance de vents tourbillonnants pour mesurer les flux turbulents de vapeur d'eau et de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) entre

ces sites d'étude et l'atmosphère. Un site d'étude a été établi sur la toundra sèche de Cambridge Bay, au Nunavut, Canada en 2012. La toundra sèche est particulièrement fréquente dans l'Extrême-Arctique, y compris dans de vastes zones de l'Arctique canadien (CAVM Team, 2003). Le présent article présente les résultats préliminaires de la variation et de la magnitude des composantes du budget de CO<sub>2</sub> de 2017 du site d'étude de la toundra sèche à Cambridge Bay.

## Matériels et méthodes

### Description du site et mesures

Le site d'étude est situé dans la toundra sèche avec pergélisol près de Cambridge Bay, Nunavut, Canada (69°7'47,7"N, 105°3'35,3"O). Les espèces végétales dominantes sur le site sont les espèces de *laïche* (*Carex* *faux-scirpe*, *Carex* *rupestris*, *Carex* *fuliginosa*, etc.) et *dedryade à feuilles entières*. Le sol du site est de type crysol turbique eutrique orthique (Groupe de travail sur la classification des sols, 1998). L'horizon organique du sol est de 0,05 à 0,2 mètre (m) de profondeur et l'horizon minéral est constitué d'un sous-sol. La couche active (c'est-à-dire la couche supérieure de sol dégelée sur le site) atteignait jusqu'à 1,4 m à la mi-août 2017. Pour la surveillance à long terme du CO<sub>2</sub> et de l'échange énergétique entre l'atmosphère et l'écosystème, un système de flux de covariance des vents tourbillonnants et un radiomètre net ont été mis en place en 2012. Ces dispositifs de surveillance ont été installés sur une tour météorologique appartenant à Environnement et Changement climatique Canada, située à environ 1 kilomètre (km) du centre de Cambridge Bay (Figure 1).

Un analyseur à infrarouge (EC150, Campbell Scientific, É.-U.) à réponse rapide à circuit ouvert de CO<sub>2</sub>/eau (H<sub>2</sub>O) et un anémomètre sonique (CSAT3, Campbell Scientific, É.-U.) ont été installés sur la tour à une hauteur de 5 m, à une distance de 0,5 m l'un de l'autre. Pour mesurer les composantes du bilan énergétique de surface, un radiomètre différentiel (CNR4, Kipp & Zonen, Pays-Bas) a été installé à une hauteur de 4 m sur la même tour et deux capteurs de flux de sol (HFP01, Campbell Scientific, É.-U.) ont été installés à une profondeur de 0,1 m près de la tour. En outre, trois sondes de température du sol (TCAV-L, Campbell Scientific, É.-U.) ont été installées à une profondeur de 0,1 m et deux capteurs d'humidité du sol (CS650, Campbell Scientific, É.-U.) ont été placés à 0,1 m de profondeur. Les vecteurs-vent tridimensionnels, les températures et les densités



Figure 1 : Le site d'étude se trouve à Cambridge Bay, au Nunavut, Canada.

de  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ ) ont été échantillonnés à un taux de 10 hertz (Hz). Trois composantes de la vélocité du vent, de la température et des concentrations de  $\text{CO}_2$  et  $\text{H}_2\text{O}$  ont été mesurées et stockées sur une carte Compact Flash (CF) dans l'enregistreur de données (CR3000, Campbell Sci., É-U.) pour le post-traitement. Une moyenne sur une demie-heure des statistiques sur les turbulences moyennes et des données météorologiques ont également été calculées en temps réel et stockées sur une carte CF dans le même enregistreur de données. Le personnel local récupérait ces données tous les deux mois. En outre, en juin et septembre 2017, l'analyseur à infrarouge a été étalonné sur le site d'étude en utilisant du gaz étalon  $\text{CO}_2$  et un générateur de point de rosée (LI610, LI-COR Biosciences, É-U.). Des chambres à diffusion forcée (chambre DF EOSENSE) ont également été installées sur le site d'étude et les données d'émission de  $\text{CO}_2$  du sol de l'une des chambres ont été utilisées pour quantifier l'ENE de l'hiver 2017.

### Traitement des données et correction des lacunes

Le flux de données acquis par la méthode de covariance des vents tourbillonnants peut s'écarter de ceux mesurés dans des conditions idéales en fonction de la topographie du site d'observation, des conditions météorologiques et de la configuration de l'instrument, notamment la hauteur d'installation, la distance de

séparation entre les deux instruments à réponse rapide et le positionnement de l'instrument (Baldocchi et al., 2001). Dans le cadre de cette étude, les données de covariance ont été traitées par le logiciel EddyPro version 6.0 (LI-COR Biogeosciences, É-U.). Plusieurs mesures correctives ont été appliquées pour obtenir un flux précis. Tout d'abord, la rotation des coordonnées a été effectuée à l'aide d'une méthode de double rotation pour s'assurer que la moyenne aux demies-heure des vents verticaux et latéraux était nulle (Kaimal and Finnigan, 1994). Après avoir appliqué ces corrections aux données de vent, nous avons calculé la moyenne des données de covariance sur une demi-heure en utilisant les données de vent à 10 Hz avec rotation des coordonnées et les concentrations de  $\text{CO}_2$  et  $\text{H}_2\text{O}$ . La « correction de la réponse en fréquence » (Moore, 1986) et la « correction de la densité de l'air » ont été appliquées aux données de covariance moyennes sur une demi-heure calculées pour le  $\text{CO}_2$  et la vapeur d'eau (Webb et al., 1980).

Pour assurer la qualité des données post-traitées, un processus de contrôle de la qualité (CQ) et d'assurance de la qualité (AQ) a été effectué conformément aux règles de qualité des données météorologiques établies par l'Organisation météorologique mondiale (OMM). Une variable mesurée est retirée si :

1. elle ne s'inscrit pas dans la limite de valeur minimale et maximale de la valeur mesurée indiquée dans le tableau 1 ; et
2. l'écart par rapport à la moyenne est supérieur à trois fois l'écart-type mobile pour la période d'une semaine.

Pour les données relatives au flux, les valeurs anormales sont éliminées en utilisant l'écart absolu médian sur une base mensuelle. En ce qui a trait aux données de flux de turbulence de CO<sub>2</sub> de nuit, le développement de la turbulence a été pris en compte pour le contrôle de la qualité (Papale et al., 2006). La méthode bootstrap, basée sur la relation entre la vitesse de friction et les données de flux de CO<sub>2</sub> de nuit avec une valeur seuil (c'est-à-dire 0,16 mètre par seconde (m/s)), a été utilisée pour réduire l'incertitude des données de CO<sub>2</sub> résultant d'un faible transport par turbulence. Pendant la période de mesure, le rendement des données de flux et des données météorologiques complémentaires a été en moyenne de 44 % et 89 %, respectivement. Le tableau 2 résume le taux de rendement de chaque variable. Pendant la période hivernale (de novembre à avril 2017), il n'y a pas eu de données de covariance de vents tourbillonnants pendant une période considérable en raison de problèmes techniques (par exemple,

Tableau 1 : Seuil des variables pour le contrôle de la qualité (CQ) et l'assurance de la qualité (AQ).

Variables	Unités	minimum	maximum
Température de l'air	°C	-80	60
Humidité relative	%	0	100
La pression de la vapeur	Pa	0	100
Vitesse de frottement	m s <sup>-1</sup>	0	2
Pression de l'air	hPa	600	1100
Vitesse du vent	m s <sup>-1</sup>	0	25
Concentration en CO <sub>2</sub>	ppm	300	500
Concentration en H <sub>2</sub> O	mmol mol <sup>-1</sup>	0	20
Flux de CO <sub>2</sub>	μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	-50	50

Tableau 2 : Taux d'acquisition des variables de mesure en 2017 à Cambridge Bay, Nunavut, Canada.

Variables	Rendement avant CQ/AQ	Rendement après CQ/AQ
Vitesse du vent	89	89
Température de l'air	89	89
Température du sol	78	78
Eau du sol Contenu	78	78
Rayonnement solaire	78	78
Chaleur sensible Flux	89	62
Flux de chaleur latente Concentration en CO	45	32
Flux de CO <sub>2</sub>	70	38
		* Unités(%)

une panne d'équipement) ou environnementaux (par exemple, les précipitations, la neige, la glace, etc.). Pour remédier aux données manquantes, une méthode normalisée de correction des lacunes proposée par Reichstein et al., (2005) a été utilisée. La valeur de flux manquante a été comblée par la valeur moyenne, dans des conditions météorologiques similaires consistant en un rayonnement d'ondes courtes descendant, une température de l'air et un déficit de pression de vapeur dans une fenêtre temporelle. Si aucune condition météorologique semblable n'est retrouvée dans une fenêtre de sept jours, la fenêtre de calcul de la moyenne est prolongée de 14 jours. La méthode de correction des lacunes a uniquement été appliquée pendant la période de croissance, de mars à septembre.

Pour répartir l'ENE entre la production primaire brute (PPB) et la respiration de l'écosystème ( $R_{eco}$ ), la  $R_{eco}$  a été calculée à l'aide de l'équation de Lloyd et Taylor (1994),

$$R_{eco}(T) = R_{ref} e^{E_0 \left( \frac{1}{T_{ref} - T_0} - \frac{1}{T - T_0} \right)}$$

où  $R_{ref}$  représente la respiration de référence spécifique au site.  $E_0$  représente une thermosensibilité qui n'a plus l'importance théorique d'une énergie d'activation.  $T_{ref}$  représente la température de référence.  $E_0$  a été établie à 308,56 kelvin (K),  $T_{ref}$  à 283,15 K et  $T_0$  à 227,13 K, selon l'équation de Lloyd et Taylor (1994). L'évolution saisonnière de la température de référence ( $R_{ref}$ ) tout au long de l'année est estimée à partir de l'ENE nocturne avec une fenêtre glissante de sept jours par bond de quatre jours. Si aucune  $R_{ref}$  n'est trouvée, les valeurs sont interpolées de façon linéaire.

## Résultats

### Conditions météorologiques

La rose des vents est utilisée pour montrer comment la vitesse et la direction du vent sont généralement réparties à un endroit particulier (Figure 2). Pendant la période d'observation, le vent dominant était d'ouest. Toutefois, de juin à août, le vent soufflait du nord-est. La vitesse moyenne annuelle du vent était de 4,9 m/s et une vitesse maximale instantanée de 17,8 m/s a été observée en mars (Figure 2). La température moyenne annuelle était de -10,7 °C. La température la plus élevée a été de 22,1 °C en août et la plus basse de -37,6 °C en février (Figure 2). La température moyenne annuelle du sol était de -4,8 °C, la plus élevée étant de 13,7 °C

en juillet et la plus basse de -22,3 °C en mars (Figure 2). Alors que la température de l'air et la température du sol présentaient des variations semblables, l'ampleur des variations de la température du sol était plus faible que celle de la température de l'air, en particulier en hiver. Cette situation est attribuable à l'effet isolant de la couverture neigeuse en hiver.

L'empreinte du flux décrit un secteur vent « observé » par le système de covariance de vents tourbillonnants mesurant les flux turbulents (par exemple, flux de  $CO_2$ ) sur le site (Figure 2). L'empreinte du flux pour l'ensemble de la période de mesure est calculée à l'aide du traitement en ligne des données sur l'empreinte du flux (Kljun et al., 2015). En fonction de l'empreinte, l'étude a démontré que le secteur est (0 à 180 °) contribuait de manière significative aux flux mesurés. Comme on retrouve une route à l'est de la tour de flux où des véhicules passent parfois, un secteur de 90 à 135 ° a été écarté de l'analyse des données.

La figure 4 montre les variations de quatre composantes radiatives de surface avec l'albédo. Le rayonnement descendant d'ondes courtes a augmenté jusqu'à environ 650 watts par mètre carré ( $W/m^2$ ) en juin (Figure 4). L'albédo était d'environ 0,8 juste avant la fonte des neiges début mai, et d'environ 0,2 jusqu'à

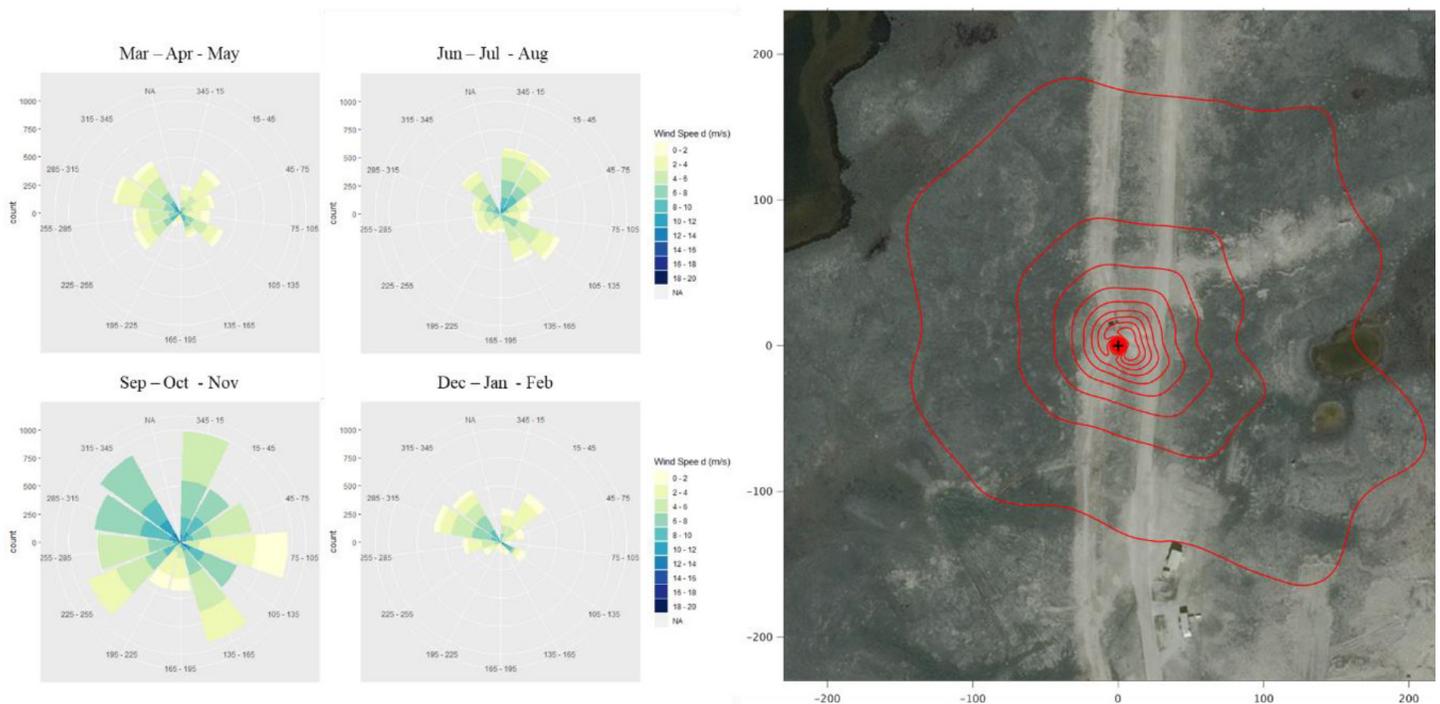


Figure 2 : Rose des vents et empreinte du flux de la direction et de la vitesse du vent, cumulés annuellement à Cambridge Bay, Nunavut, Canada, en 2017.

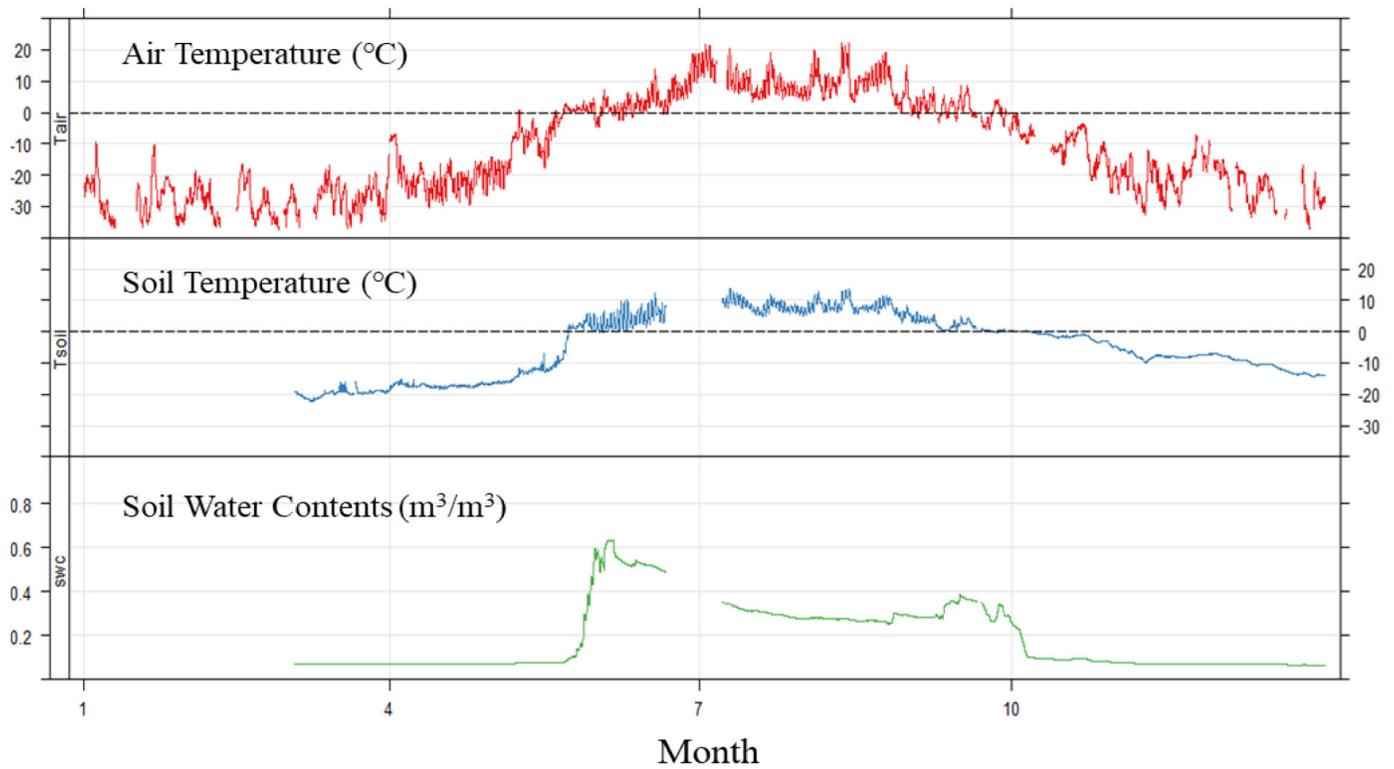


Figure 3 : Série chronologique de la température de l'air, de la température du sol et de la teneur en eau du sol à Cambridge Bay, Nunavut, Canada, en 2017.

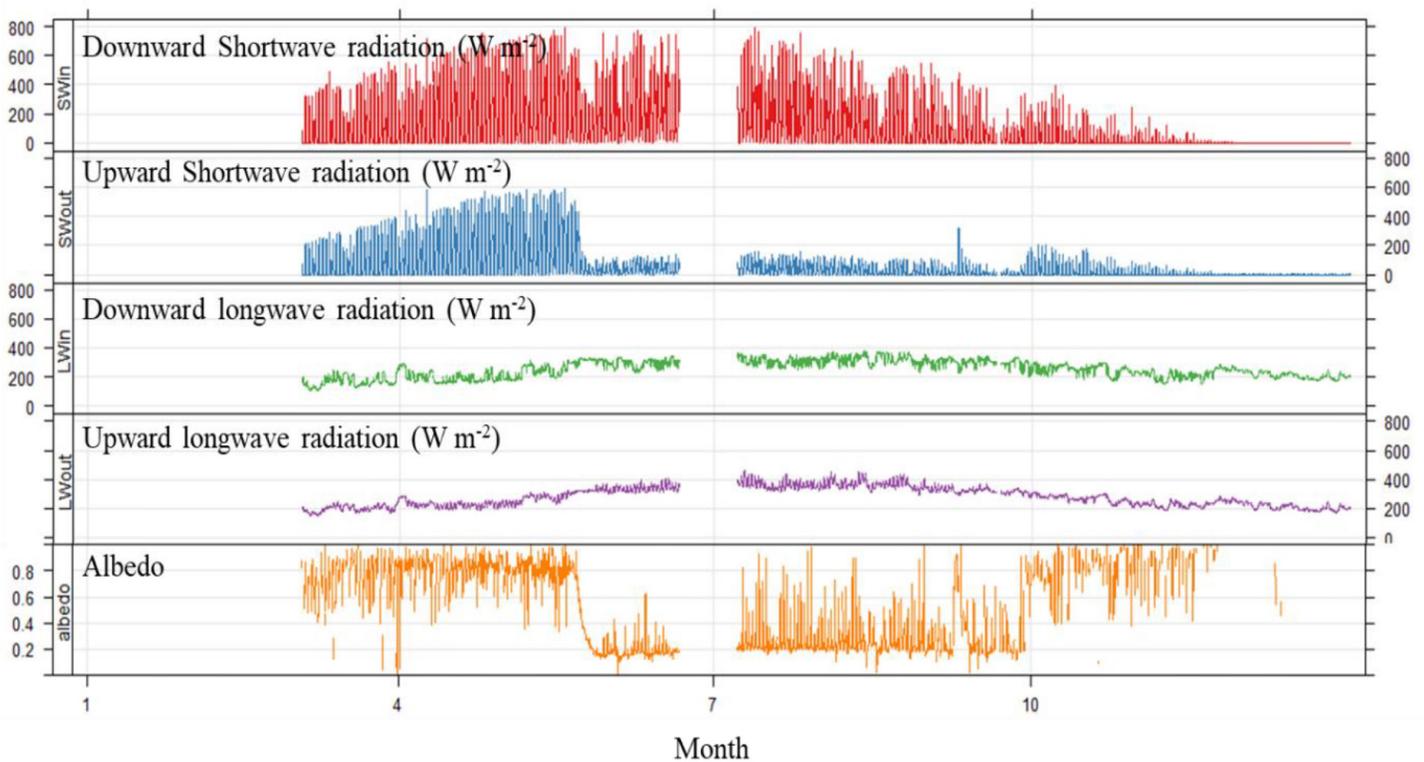


Figure 4 : Série chronologique des composantes radiatives de surface à Cambridge Bay, Nunavut, Canada, en 2017.

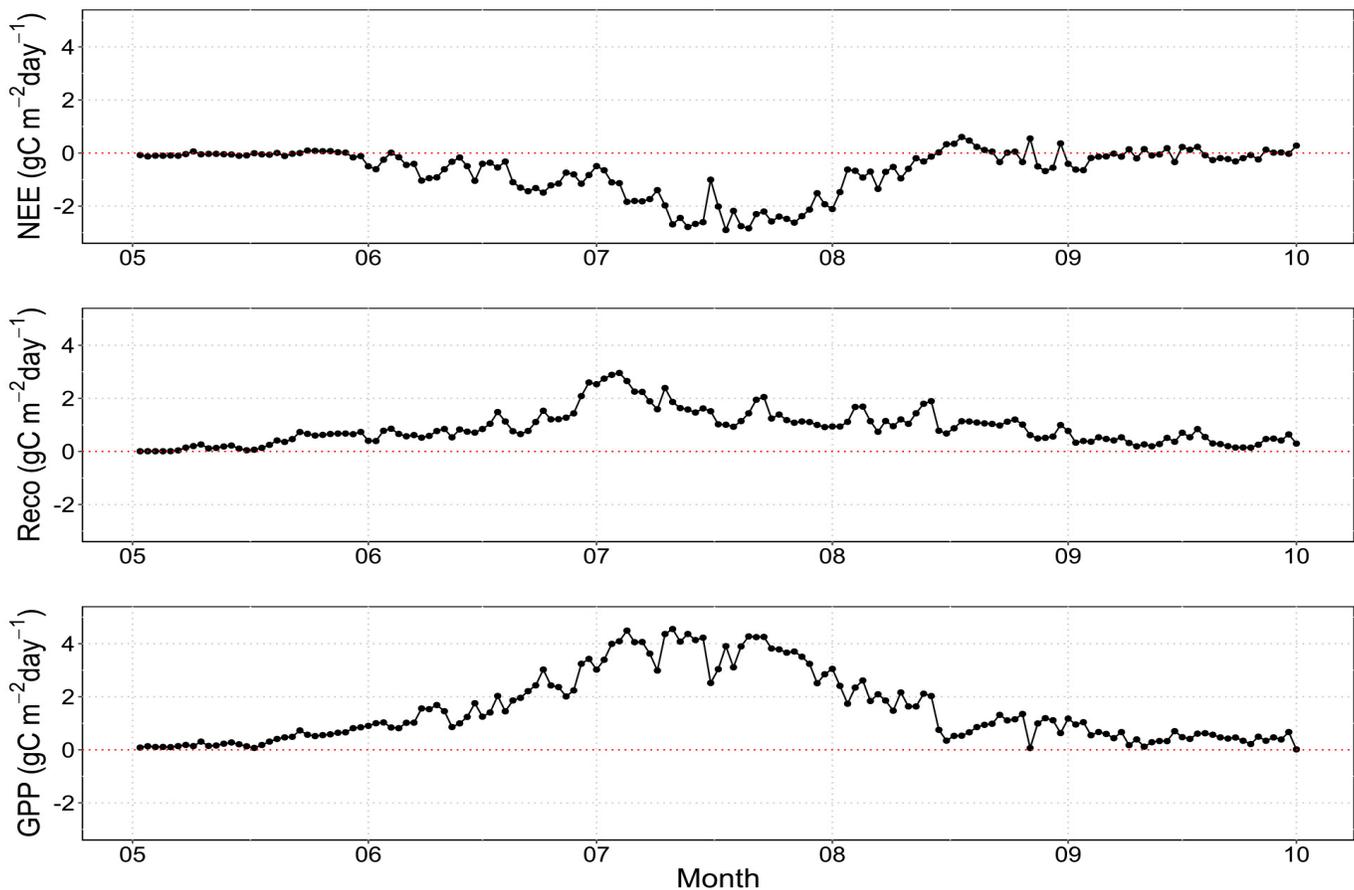


Figure 5 : Séries chronologiques de l'échange net entre écosystèmes (ENE), de la respiration des écosystèmes ( $R_{eco}$ ) et de la productivité primaire brute (PPB) à Cambridge Bay, Nunavut, Canada, en 2017.

la fin septembre (Figure 4). Le site d'étude a été totalement exposé à l'atmosphère vers la mi-juin et était partiellement recouvert de neige vers la fin septembre. Le rayonnement à ondes longues ascendantes était plus important en été et moins important en hiver que le rayonnement à ondes longues descendantes. Par conséquent, la variation du bilan radiation se trouvait entre  $-138,9 \text{ W/m}^2$  et  $541,1 \text{ W/m}^2$ , la moyenne annuelle étant de  $60,8 \text{ W/m}^2$ .

### Bilan carbone

La figure 5 montre la variation moyenne quotidienne de l'ENE, de la  $R_{eco}$  et de la PPB entre mai et septembre 2017. La PPB a été calculée en soustrayant l'ENE par la  $R_{eco}$ . En fonction des données mesurées et des données dont les lacunes ont été comblées, l'ENE journalier se situait entre  $-2,8$  et  $0,6$  gramme de carbone (gC) par mètre carré ( $\text{m}^2$ ) par jour avec un ENE accumulé de  $-100,2 \text{ gC/m}^2$ . En juin, l'ENE est devenu négatif (c'est-à-dire qu'il est devenu un piège à  $\text{CO}_2$ ). En juillet, l'ENE a atteint son maximum ( $-2,8 \text{ gC/m}^2/\text{jour}$ ), après quoi il a commencé à diminuer. En septembre, l'ENE fluctuait

autour de zéro. Alors que la  $R_{eco}$  quotidienne se situait entre 0 et  $3,0 \text{ gC/m}^2/\text{jour}$ , la PPB quotidienne se situait entre 0 et  $4,6 \text{ gC/m}^2/\text{jour}$ . La  $R_{eco}$  a atteint sa valeur maximale au début juillet, alors que la PPB a atteint son sommet à la mi-juillet. Cela peut s'expliquer par la croissance continue de la végétation en été, qui atteint sa couverture foliaire maximale en juillet. La  $R_2$  et la PPB accumulée étaient respectivement de  $135,2 \text{ gC/m}^2$  et de  $235,4 \text{ gC/m}^2$  pour la période de cinq mois s'étendant de mai à septembre.

Les calculs pour la  $R_{eco}$  pendant la saison d'hiver n'ont pas pu être dérivés des données de covariation de vents tourbillonnants en raison de l'absence de données pendant une période considérable (novembre à avril 2017). La  $R_{eco}$  hivernale a été estimée à l'aide des données de la chambre DF. Malheureusement, les données de la chambre n'étaient pas disponibles au cours de l'hiver 2016. La  $R_{eco}$  a été calculé en utilisant uniquement les données d'octobre à décembre 2017. Il a été supposé que la  $R_{eco}$  ne varie pas beaucoup pendant l'hiver et que les données de la chambre étaient représentatives de la  $R_{eco}$ . La moyenne mensuelle

cumulée de la  $R_{eco}$  d'octobre à décembre a été utilisée pour représenter la valeur mensuelle cumulée pour toute la période hivernale (de janvier à avril et d'octobre à décembre). D'octobre à décembre, la  $R_{eco}$  mensuelle de la chambre DF était de  $1,3 \text{ gC/m}^2$ . En fonction de cette hypothèse, la  $R_{eco}$  était de  $9,1 \text{ gC/m}^2$  pendant la saison hivernale. Cette magnitude représente environ 7 % de la quantité de  $R_{eco}$  pendant la saison de croissance. Enfin, en 2017, l'ENE annuel a été estimé à  $-91,1 \text{ gC/m}^2$ .

## Sommaire et conclusions

À partir du flux de covariance de vents tourbillonnants et de mesures complémentaires, l'étude a rapporté des résultats préliminaires sur l'échange de  $\text{CO}_2$  dans une toundra sèche à Cambridge Bay, au Nunavut, Canada, en 2017. Dans l'ensemble, les données obtenues sont fiables. Cependant, un grand nombre de données étaient manquantes (ou de mauvaise qualité) pendant la saison hivernale, ce qui a causé une grande incertitude dans la quantification de l'ENE annuel calculé en fonction des données de flux de covariance de vents tourbillonnants. Par conséquent, la  $R_{eco}$  hivernale a été quantifiée en utilisant les données de la chambre DF, en tenant pour acquis que les données de la chambre représentent la  $R_{eco}$  hivernale. La  $R_{eco}$  a atteint sa valeur maximale au début juillet, alors que la PPB a atteint son sommet à la mi-juillet. Par conséquent, l'ENE a atteint son maximum à la mi-juillet. La PPB, la  $R_{eco}$  et l'ENE annuels sont évalués à  $235,4 \text{ gC/m}^2$ ,  $144,3 \text{ gC/m}^2$  et  $-91,1 \text{ gC/m}^2$  respectivement. Les résultats préliminaires indiquent qu'en 2017, le site d'étude de la toundra sèche a agi comme un piège à  $\text{CO}_2$  atmosphérique. Toutefois, en raison de l'incertitude causée par les lacunes de données sur l'ENE qui ont été comblées, en particulier pour les données de la saison hivernale 2017, il est prématuré de tirer une telle conclusion.

Un environnement spécifique à l'Arctique, comprenant des éléments comme une très faible magnitude d'échange de carbone, des nuits blanches et des conditions météorologiques rigoureuses, rendent difficiles les mesures de flux de covariance de vents tourbillonnants et l'application des méthodes traditionnelles de correction. Pour réduire l'incertitude dans la quantification du bilan des émissions annuelles de  $\text{CO}_2$ , d'autres méthodes sont nécessaires pour permettre une analyse plus approfondie. Ces méthodes comprennent une méthode de réseau neural pour

comblar les lacunes et une courbe de réponse à la lumière pour répartir l'ENE (Dengel et al., 2013 ; Runkle et al., 2013). De plus, les mesures de la  $R_{eco}$  doivent être améliorées pendant la saison hivernale pour évaluer l'ENE annuel sur cette longue période. Une analyse plus approfondie sera menée pour mieux comprendre les facteurs de variations saisonnières et interannuelles du bilan carbone dans cet écosystème. Des analyses supplémentaires des ensembles de données à long terme (depuis 2012) permettront également de mieux comprendre la réaction des écosystèmes de toundra sèche à différentes conditions environnementales.

## Considérations d'ordre communautaire

La coopération avec la communauté locale est un facteur clé pour les études de terrain dans la toundra arctique. À cet égard, le KOPRI a communiqué étroitement avec le personnel local de Cambridge Bay, au Nunavut, dans le cadre du projet CAPEC. La formation sur place et la communication continue avec les chercheurs du KOPRI en Corée du Sud ont permis au personnel local d'accomplir diverses tâches, notamment le diagnostic de l'état des instruments et l'entretien du site de recherche. On s'attend de plus à ce que les activités de surveillance à long terme du KOPRI à Cambridge Bay, au Nunavut, contribuent directement et indirectement à la communauté locale. Les membres des communautés locales pourront acquérir une meilleure compréhension des changements de l'environnement local dus au changement climatique et considérer les changements actuels en regard du savoir traditionnel.

## Remerciements

Cette recherche a été soutenue par une bourse de la Fondation nationale de recherche de Corée, accordée par le gouvernement coréen (MSIT, le ministère des Sciences et ICT) NRF-2016M1A5A1901769) (KOPRI-PN19081). Ce projet s'intitule [Traduction] « Surveillance des changements environnementaux du pergélisol circum-Arctique, prévisions et futurs développements et techniques relatives aux biomatériaux utiles » (projet CAPEC). Nous remercions tout particulièrement le Dr Donald McLennan pour son aide dans la classification des sols sur le terrain.

## Références

- Baldocchi, D., Falge, E., Gu, L., Olson, R., Hollinger, D., Running, S., Anthoni, P., Bernhofer, C., Davis, K., Evans, R., Fuentes, J., Goldstein, A., Katul, G., Law, B., Lee, X., Malhi, Y., Meyers, T., Munger, W., Oechel, W., Paw, K., Pilegaard, K., Schmid, H., Valentini, R., Verma, S., Vesala, T., Wilson, K., Wofsy, S. 2001. FLUXNET: A New Tool to Study the Temporal and Spatial Variability of Ecosystem-Scale Carbon Dioxide, Water Vapor, and Energy Flux Densities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82(11):2415–2434. doi: 10.1175/1520-0477(2001)082<2415:fantts>2.3.co;2.
- CAVM Team. 2003. Circumpolar Arctic Vegetation Map. Conservation of Arctic Flora and Fauna (CAFF) Map No. 1. U.S. Fish and Wildlife Service: Anchorage, Alaska. ISBN: 0-9767525-0-6, ISBN-13: 978-0-9767525-0-9.
- Dengel, S., Zona, D., Sachs, T., Aurela, M., Jammert, M., Parmentier, F., Oechel, W., Vesala, T. 2013. Testing the applicability of neural networks as a gap-filling method using CH<sub>4</sub> flux data from high latitude wetlands. *Biogeosciences*, 10(12):8185–8200. doi: 10.5194/bg-10-8185-2013.
- Goodrich, J.P., Oechel, W.C., Gioli, B., Moreaux, V., Murphy, P.C., Burba, G., Zona, D. 2016. Impact of different eddy covariance sensors, site set-up, and maintenance on the annual balance of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> in the harsh Arctic environment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 228:239–251. doi: 10.1016/j.agrformet.2016.07.008.
- Kaimal, J., Finnigan, J. 1994. Atmospheric boundary layer flows: their structure and measurement. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. doi: 10.1002/qj.49712152512.
- Kljun, N., Calanca, P., Rotach, M.W., Schmid, H.P. 2015. A simple two-dimensional parameterisation for Flux Footprint Prediction (FFP). *Geoscientific Model Development*, 8(11):3695–3713. doi:10.5194/gmd-8-3695-2015.
- Lloyd, J., Taylor, J. 1994. On the Temperature Dependence of Soil Respiration. *Functional Ecology*, 8(3):315–323.
- McGuire, A., Christensen, T., Hayes, D., Heroult, A., Euskirchen, E., Kimball, J., Koven, C., Lafleur, P., Miller, P., Oechel, W., Peylin, P., Williams, M., Yi, Y. 2012. An assessment of the carbon balance of Arctic tundra: comparisons among observations, process models, and atmospheric inversions. *Biogeosciences*, 9(8):3185–3204. doi: 10.5194/bg-9-3185-2012.
- Moore, A. 1986. Frequency Response Corrections for Eddy Correlation Systems. *Boundary-Layer Meteorology*, 37(1):17–35 doi:10.1007/BF00122754.
- Papale, D., Reichstein, M., Aubinet, M., Canfora, E., Bernhofer, C., Kutsch, W., Longdoz, B., Rambal, S., Valentini, R., Vesala, T., Yakir, D. 2006. Towards a standardized processing of Net Ecosystem Exchange measured with eddy covariance technique: algorithms and uncertainty estimation. *Biogeosciences*, 3(4):571–583. doi: 10.5194/bg-3-571-2006.
- Reichstein, M., Falge, E., Baldocchi, D., Papale, D., Aubinet, M., Berbigier, P., Bernhofer, C., Buchmann, N., Gilmanov, T., Granier, A., Grunwald, T., Havrankova, K., Ilvesniemi, H., Janous, D., Knohl, A., Laurila, T., Lohila, A., Loustau, D., Matteucci, G., Meyers, T., Miglietta, F., Ourcival, J.-M., Pumpanen, J., Rambal, S., Rotenberg, E., Sanz, M., Tenhunen, J., Seufert, G., Vaccari, F., Vesala, T., Yakir, D., Valentini, R. 2005. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. *Global Change Biology*, 11:1424–1439. doi: 10.1111/j.1365-2486.2005.001002.x.
- Runkle, B.R.K., Sachs, T., Wille, C., Pfeiffer, E.-M., Kutzbach, L. 2013. Bulk partitioning the growing season net ecosystem exchange of CO<sub>2</sub> in Siberian tundra reveals the seasonality of its carbon sequestration strength. *Biogeosciences*, 10(3):1337–1349. doi: 10.5194/bg-10-1337-2013.
- Schuur, E., McGuire, A., Schädel, C., Grosse, G., Harden, J., Hayes, D., Hugelius, G., Koven, C., Kuhry, P., Lawrence, D., Natali, S., Olefeldt, D., Romanovsky, V., Schaefer, K., Turetsky, M., Treat, C., Vonk, J. 2015. Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature*, 520(7546):171–179. doi: 10.1038/nature14338.
- Soil Classification Working Group. 1998: The Canadian System of Soil Classification – 3rd edition. Agriculture and Agri-Food Canada. Ottawa, Ontario. ISBN 0-660-17404-9.

# ÉVALUATION ET SURVEILLANCE DU PERGÉLISOL DANS LE PARC TERRITORIAL DE KUGLUK, AU NUNAVUT, DANS UNE PERSPECTIVE DE SENSIBILISATION DE LA COMMUNAUTÉ

**S. Coulombe<sup>1\*</sup>, M.-A. Ducharme<sup>2</sup>, M. Allard<sup>2</sup>, L. Papatsie<sup>3</sup>, G. Atatahak<sup>3</sup>, L. Adjun<sup>3</sup>, S. Bilodeau<sup>2</sup> et S. Page<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> *Savoir polaire Canada, Cambridge Bay, Nunavut, Canada*

<sup>2</sup> *Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec, Québec, Canada*

<sup>3</sup> *Nunavut Parks & Special Places, Gouvernement du Nunavut, Iqaluit, Nunavut, Canada*

<sup>4</sup> *Secrétariat du changement climatique, gouvernement du Nunavut, Iqaluit, Nunavut, Canada*

\* [stephanie.coulombe@polar.gc.ca](mailto:stephanie.coulombe@polar.gc.ca)

## Résumé

Le sentier des véhicules tout-terrain (VTT) du parc territorial de Kugluk subit d'importants dommages dus au dégel du pergélisol, à la fonte des coins de glace, aux multiples glissements de terrain et à l'érosion intense des ravins. Des modifications annuelles et le détournement d'une partie du sentier sont nécessaires pour le garder utilisable, mais la division des Parcs et Endroits spéciaux (PN&SP) du gouvernement du Nunavut et les dirigeants de la communauté aimeraient planifier un itinéraire à long terme approprié pour le sentier. Un projet collaboratif impliquant la division des Parcs du gouvernement du Nunavut, la communauté de Kugluktuk, le Climate Change Secretariat (CCS) du gouvernement du Nunavut, le Centre d'études Nordiques (CEN) de l'Université Laval et Savoir polaire Canada évaluent les processus morphologiques et les changements de conditions du pergélisol pour aider à atteindre cet objectif. Ce projet de recherche communautaire a trois objectifs principaux :

1. acquérir de nouvelles connaissances sur les conditions du pergélisol et les processus d'érosion des pentes ;
2. surveiller les changements du paysage ; et
3. soutenir le renforcement des capacités et le transfert des connaissances en offrant une formation en matière de collecte et d'analyse des données.

Le travail de terrain comprend la cartographie des changements géomorphologiques, les mesures de la profondeur du dégel, le carottage du pergélisol et les relevés par géoradar. Le savoir traditionnel local et la participation de membres de la communauté issus de plusieurs générations, à toutes les phases du projet de recherche, fournissent des informations et des perspectives essentielles sur la sensibilité du terrain et sont une source d'inspiration pour la recherche de solutions et la prise de décisions.

Référence suggérée :

Coulombe, S., Ducharme, M.-A., Allard, M., Papatsie, L., Atatahak, G., Adjun, L., Bilodeau, S. and Page, S. 2019. Évaluation et surveillance du pergélisol dans le parc territorial de Kugluk, au Nunavut, dans une perspective de sensibilisation de la communauté. *Savoir polaire : Aqhaliat 2019, Savoir polaire Canada*, p. 31–40. DOI: 10.35298/pkc.2019.04

## Introduction

L'Arctique connaît actuellement un réchauffement rapide et les futures augmentations de température dans la région devraient être deux à trois fois supérieures à la moyenne mondiale (AMAP, 2017 ; Bush et Lemmen, 2019). Les changements climatiques auront une incidence sur le pergélisol en augmentant saisonnièrement la profondeur de la couche dégelée (couche active) et en faisant fondre la glace de sol. Le dégel du pergélisol à forte teneur en glace et le déplacement du sol et les modifications des paysages qui en résultent peuvent avoir des effets importants sur l'efficacité, la sécurité et la fiabilité des voies de transport nordiques, telles que les routes et les pistes d'atterrissage des avions (Allard et al., 2012 ; Doré, Niu et Brooks, 2016 ; Hjort et al., 2018). Les sentiers semi-permanents (c'est-à-dire les sentiers de véhicules tout-terrain (VTT)) utilisés par les Inuits pour se déplacer sur terre sont également considérés comme très sensibles au changement climatique (Prno et al., 2011 ; Ford et al., 2019). Ces sentiers sont des installations essentielles pour les communautés de l'Arctique – ils permettent d'accéder aux zones de chasse et de pêche traditionnelles ainsi qu'aux zones d'importance historique et culturelle pour les populations locales.

Au cours des dernières décennies, le sentier de VTT traversant le parc territorial de Kugluk a subi d'importants dommages dus au dégel du pergélisol le long de son parcours et à l'érosion des berges de la rivière Coppermine. Le sentier donne accès aux points de repère du parc et aux ressources intérieures, mais des modifications et quelques déviations sont régulièrement nécessaires pour qu'il reste utilisable. La division des Parcs et des endroits spéciaux du gouvernement du Nunavut et les dirigeants de la communauté sont à la recherche de solutions pratiques à long terme pour maintenir le fonctionnement du sentier tout en préservant l'intégrité de l'écosystème. L'évaluation des conditions géomorphologiques et de drainage et la recherche d'un meilleur itinéraire, qui constituent une préoccupation majeure pour la communauté, ont été considérées comme des priorités dans le plan de gestion des parcs de Kugluk. En réponse à ces besoins et préoccupations, le Comité mixte de planification et de gestion de la communauté de Kugluk (CJPMC) et la division des Parcs et des endroits spéciaux ont lancé ce projet communautaire en 2017 en collaboration avec la communauté de Kugluktuk, le Climate Change Secretariat (CCS) du gouvernement

du Nunavut, le Centre d'études Nordiques (CEN) de l'Université Laval et Savoir polaire Canada. L'objectif général de ce projet est d'améliorer l'accès à la terre pour les Nunavummiut, en particulier ceux qui se rendent dans le parc territorial de Kugluk et ses environs et qui le traversent.

Sous la direction du CJPMC de Kugluk, trois objectifs ont été établis :

1. accroître nos connaissances sur les conditions du pergélisol et les processus d'érosion des pentes dans le parc, en particulier le long des sentiers de VTT ;
2. surveiller les changements de paysage ; et
3. impliquer la jeunesse locale à la fois dans l'évaluation de la sensibilité du terrain et dans les phases de construction du projet afin d'offrir des possibilités de formation et d'acquisition de compétences.

Cet article présente les activités de recherche, de sensibilisation et de formation qui ont eu lieu de 2017 à 2019. Il comprend les résultats préliminaires de la première phase des travaux, en se concentrant sur les conditions de pergélisol et la sensibilité du terrain le long du nouveau sentier de VTT proposé. D'une perspective d'adaptation aux changements climatiques, ce projet permettra d'identifier les zones où les conditions de la glace de sol devraient être particulièrement problématiques et pourraient nécessiter une attention accrue lors de la construction et de l'entretien du sentier de promenade.

## Zone de recherche

Le parc territorial Kugluk (67,8°N, -115,3°O, environ 50 mètres (m) au-dessus du niveau de la mer) se trouve à environ 12 kilomètres (km) du hameau de Kugluktuk (Figure 1). Kugluktuk est situé à l'embouchure de la rivière Coppermine et constitue la communauté la plus occidentale du Nunavut. La zone du parc est très importante pour la communauté car elle donne accès à des terrains de camping et de chasse traditionnels utilisés pour des activités de subsistance et culturelles qui contribuent au bien-être de la communauté et des individus. Depuis plus de 3 500 ans, ce site a été continuellement utilisé par les hommes pour la pêche saisonnière et à la chasse au caribou pour la subsistance (Parks et Endroits spéciaux Nunavut, 2019). En raison de

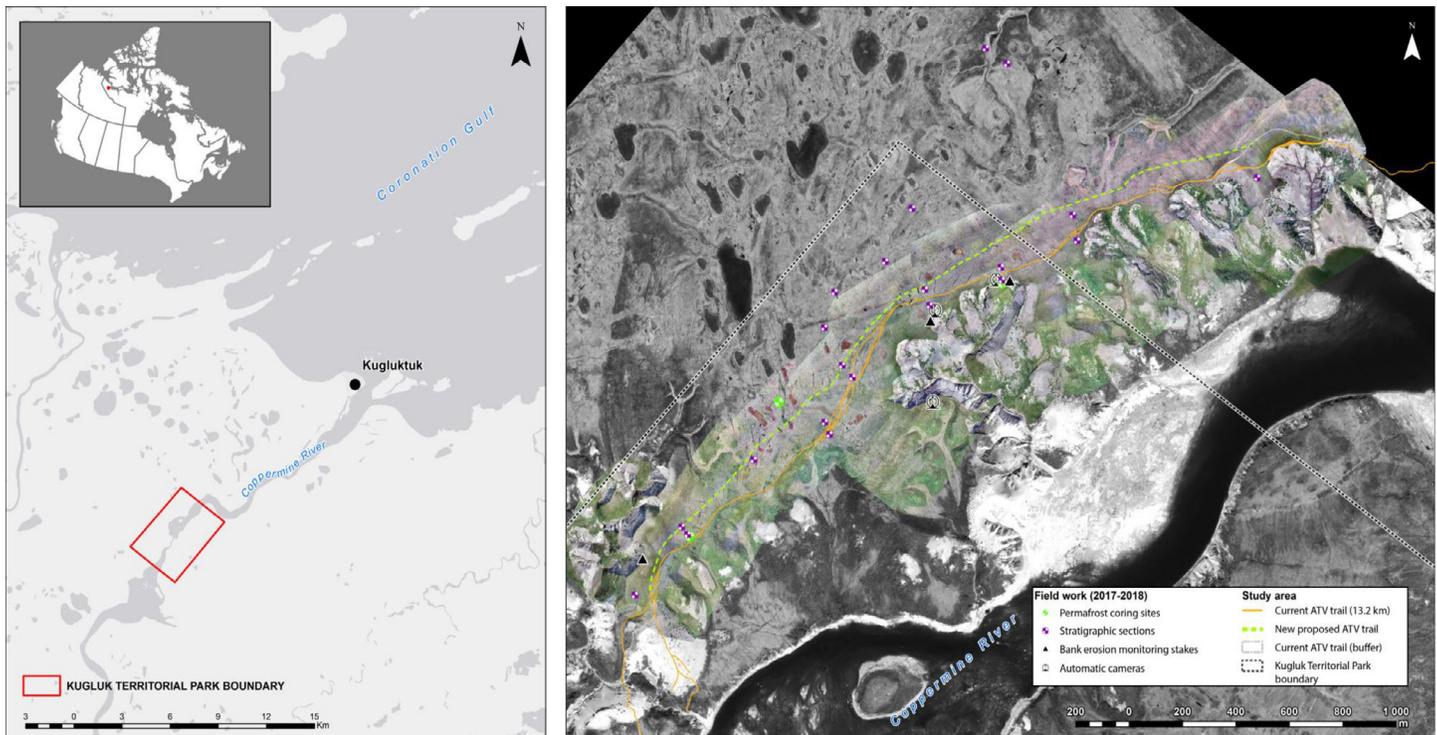


Figure 1 : Emplacement du parc national Kugluk, Nunavut (gauche). Sentier VTT actuel (orange) et nouveau sentier VTT proposé (vert), et sites de carottage (droite).

sa valeur culturelle, historique et panoramique, le site a été ciblé pour devenir un parc protégé en 1969. Lors de la création du Nunavut (1999), la responsabilité du parc a été transférée au gouvernement du Nunavut.

La température annuelle de l'air de Kugluk est de  $-10,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , avec des moyennes mensuelles de  $-27,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  en février et de  $+10,9\text{ }^{\circ}\text{C}$  en juillet (Environnement et Changement climatique Canada, 2019). Cette région reçoit une moyenne de précipitations annuelle de 247 millimètres (mm), dont 60 % tombent en pluie entre juin et septembre (Environnement et Changement climatique Canada, 2019). La région d'étude est située dans une zone où le pergélisol continu est d'une épaisseur d'environ 100-500 m, d'après les données sur la température (Smith et Burgess, 2002). Les températures du pergélisol ont été enregistrées sur deux sites de surveillance à l'est de Kugluk, entre 1995 et 1996 (Wolfe, 2000). La température annuelle moyenne du sol à une profondeur d'environ 15 m était d'environ  $-6,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  et  $-6,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  pendant cette période (une année complète de données). Ces sites de surveillances ne sont plus en activité et, par conséquent, aucune donnée récente n'était accessible au début de ce projet.

La cartographie à grande échelle de la géologie de surface a été entreprise dans la région par St-Onge

(1988), Kerr, Dredge et Ward (1997), Dredge (2001) et St-Onge (2012). Le paysage actuel de la région de Kugluk est caractérisé par des basses terres côtières et une série de terrasses et de deltas s'élevant d'environ 10 à 170 m au-dessus du niveau de la mer dans le delta marin (St-Onge, 2012). Le parc est situé sur une terrasse de delta, où se trouve un vaste réseau de polygones de lisières de glace.

## Matériels et méthodes

### Travaux sur le terrain

Ce projet de recherche a commencé par une évaluation préliminaire de la géologie de surface et des processus périglaciaires dans le parc, guidée par le CJPMC de Kugluk et le NP & SP. Les activités sur le terrain se sont concentrées sur le sentier de VTT actuel et le nouveau sentier proposé (Figure 1). Une imagerie par satellite contemporaine à haute résolution spatiale (GeoEye, pixel = 0,5 m ; 2017) et des photographies aériennes historiques (photos datées de 1950, 1993 et 2010) ont été utilisées pour quantifier les changements dans les lacs et les étangs thermokarstiques de 1950 à 2010. Outre les techniques d'interprétation visuelle pour la cartographie, une fonction de classification semi-automatique a été utilisée pour extraire les lacs et les étangs de l'image

satellite et des photographies aériennes. Tous les processus géomorphologiques et les formes de terrain (par exemple, les zones sensibles à l'affaissement dû au dégel, les ravines, les polygones de lisière de glace) ont été identifiés et numérisés manuellement à l'écran dans un système d'information géographique pour produire une carte précise de la région.

Le parc compte de nombreux sites archéologiques inscrits auprès du ministère de la Culture et du Patrimoine (gouvernement du Nunavut) et de l'Inuit Heritage Trust. Un archéologue a donc été impliqué dans nos activités de terrain pour s'assurer qu'aucun artefact archéologique n'était perturbé. Des carottes de pergélisol intactes ont été prélevées à l'aide d'une foreuse portable équipée d'un carottier à carbure de diamant de 4 pouces. Deux forages peu profonds ont été réalisés à des profondeurs de 5 m et 4,5 m, respectivement. Toutes les carottes gelées et les échantillons localisés ont été photographiés et décrits sur le terrain relativement au type de sédiment et à la cryostratigraphie, en mettant l'accent sur le type de sédiment, la teneur en glace et les motifs de la glace (French et Shur, 2010 ; Gilbert, Kanevskiy et Murton, 2016). Les échantillons ont été conservés congelés, puis envoyés au laboratoire de l'Université Laval pour une analyse plus approfondie (pour le contenu en glace par exemple). La distribution granulométrique du sol et sa teneur en glace sont des informations essentielles pour évaluer le potentiel d'affaissement dû au dégel. La profondeur du dégel a été mesurée à de nombreux endroits (n = 24) dans le parc en creusant des fosses dans le sol.

Les deux forages ont été équipés d'enregistreurs automatiques de données (LogR Systems Inc.) et de câbles de thermistance. Les deux câbles de thermistance étaient équipés de 16 capteurs de température installés entre 0,15 m et environ 5 m sous la surface du sol. Les câbles ont été placés dans des tuyaux en PVC remplis d'huile de silicone pour assurer un contact thermique optimal. L'acquisition des données horaires a commencé le 25 juillet 2018. Ces sites de surveillance fourniront des enregistrements précieux sur l'épaisseur de la couche active et le régime de température du pergélisol dans la région d'étude. Ces mesures sont nécessaires pour évaluer comment les changements climatiques auront une incidence sur la stabilité et le comportement du sol, qui sont fortement influencés par la température du sol.

Une étude par géoradar a été réalisée en juillet 2018 pour étudier le sol gelé sous le nouveau sentier de VTT proposé (Figure 1). Les systèmes de géoradar utilisent

des antennes radar d'émission et de réception séparées. Une antenne d'émission produit une série d'impulsions électromagnétiques qui se propagent dans le sol et qui sont réfléchies lorsque les propriétés du sol changent. Cet outil est bien adapté à la cartographie de l'épaisseur de la couche active (couche de surface non gelée/pergélisol gelé) et à la stratigraphie du pergélisol en raison des grands contrastes de propriétés diélectriques entre les différentes couches et structures souterraines (Hinkel et al., 2001 ; Kneisel et al., 2008). Le géoradar est très utile pour détecter les coins de glace et estimer leur profondeur et leur taille car ils génèrent des modèles de réflexion spécifiques appelés réflecteurs hyperboliques (Fortier et Allard, 2004 ; Jørgensen et Andreasen, 2007 ; LeBlanc et al., 2012). L'instrument utilisé dans ce projet était un contrôleur pulseEKKO PRO à capteurs et logiciel avec des antennes de 100 mégahertz (MHz) et 200 MHz. Les mesures à haute fréquence (par exemple 200 MHz) ont généralement une meilleure résolution verticale pour détecter les structures proches de la surface dans le pergélisol (par exemple les coins de glace), mais n'atteignent que de faibles profondeurs. Inversement, les antennes basse fréquence (par exemple 50 et 100 MHz) atteignent des profondeurs plus importantes, mais avec une résolution plus faible. Les profils du géoradar ont été calibrés et corrélés avec les carottes de sol et les mesures de la profondeur de dégel. Les profils ont été post-traités à l'aide du logiciel privé Sensor and Software EKKO Project Version 5. Le post-traitement comprenait la correction du temps zéro et l'intégration des données GPS, la topographie et le filtrage horizontal pour améliorer la visualisation des réflecteurs horizontaux.

### Participation de la communauté dans le projet

Dès le début, ce projet de collaboration a impliqué un échange de connaissances à différents stades du processus de recherche (par exemple, conception du projet, collecte de données, interprétation des résultats). Un aîné local a également participé à ce projet, apportant ses connaissances sur les changements survenus dans le parc et ses environs, sur la manière d'évaluer la sécurité du terrain et sur la manière dont des problèmes similaires ont été traités dans le passé. Ces connaissances ont facilité la compréhension à l'échelle locale des changements qui se produisent dans la région. Un autre aspect important de ce projet consistait à offrir des possibilités d'apprentissage et de formation aux membres des communautés et aux jeunes locaux en matière de science du pergélisol, de techniques de surveillance et de transfert de connaissances concernant la manière dont l'évaluation est effectuée.

Un groupe de jeunes de Kugluktuk, accompagné de techniciens de terrain de Cambridge Bay, ont rejoint les chercheurs pendant plusieurs jours pour effectuer l'évaluation des terres.

## Résultats préliminaires

### Évolution des lacs et des étangs

Le nombre de lacs et d'étangs thermokarstiques est passé de 244 en 1954, à 618 en 1993 et à 1 413 en 2010, soit une augmentation de 480 % au cours des 60 dernières années (Figure 2). La surface totale a également augmenté (0,363 km<sup>2</sup> à 0,446 km<sup>2</sup> ou + 23 %) au cours de la même période. Il est évident qu'il y a eu une augmentation du nombre de petits lacs et d'étangs en raison de la dégradation du coin de glace. Ces petites masses d'eau évoluent à partir de l'agrandissement des étangs enfermés dans la dépression des polygones de basse terre à coins de glace et de la fonte des coins de glace (profonde dépression remplie d'eau). La plupart des grands lacs se sont étendus latéralement par érosion thermique

et mécanique au cours de cette période de 60 ans. La cartographie détaillée met également en évidence une possible dégradation causée par un ancien sentier de VTT (1993). Il en résulte souvent une dégradation longitudinale des dépressions (ou coin de glace).

### Conditions du pergélisol

Les journaux de forage présentés à la figure 3 indiquent une séquence de sable moyen à grossier et de sédiments à grain fin (limon et argile). Les profondeurs de dégel mesurées à la mi-juillet (2017 et 2018) varient entre 0,4 et 1,2 m (moyenne : 0,75 m), en fonction de l'humidité du sol et de la couche de tourbe. De la surface jusqu'à environ 0,5 m, le bloc supérieur (C) est composé de tourbe fibreuse mélangée à des matériaux sableux. Le bloc B est composé de sable moyen à grossier pauvre en glace, intercalé de couches de limon et d'argile présentant une cryostructure en suspension. Les couches de sable ont un cryofacies de sédiments pauvres en glace avec une cryostructure sans structure,

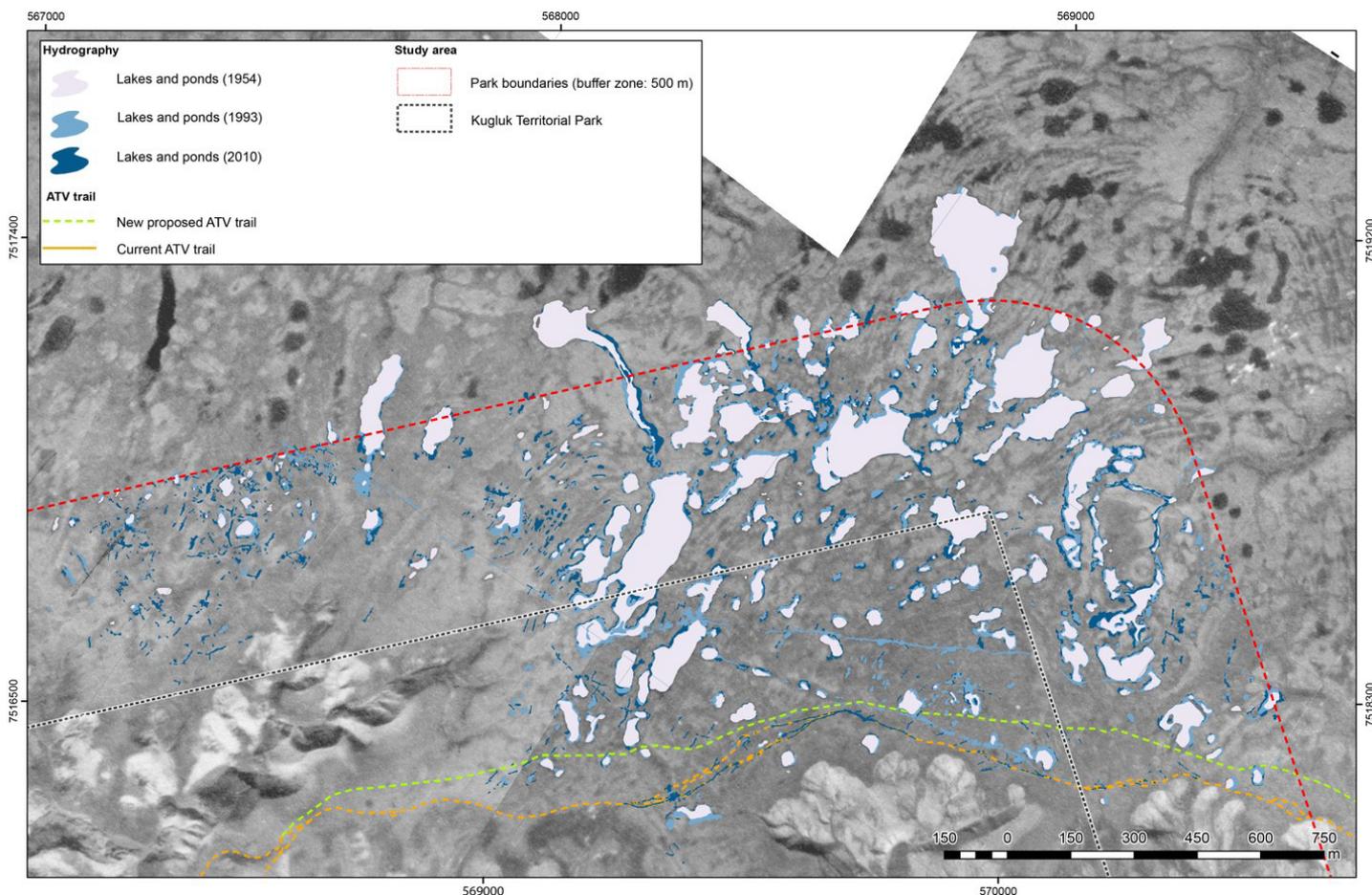


Figure 2 : Évolution du nombre de lacs et d'étangs et de la superficie des lacs.

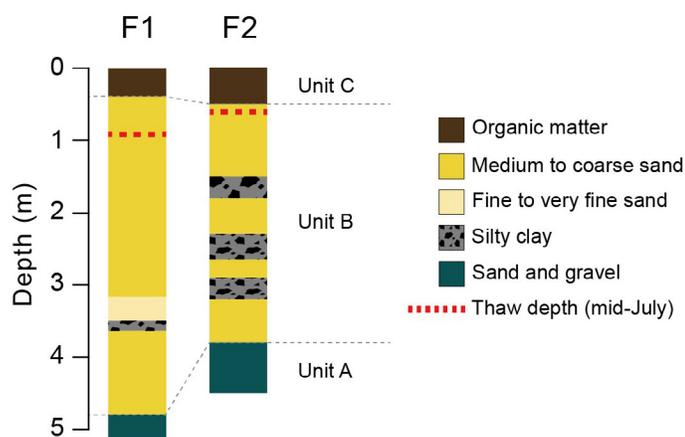


Figure 3 : Relevés des deux forages réalisés en juillet 2017 (F1) et en juillet 2018 (F2).

essentiellement composée de glace poreuse. Ce type de glace de sol se trouve dans les pores des sols et n'est pas visible à l'œil nu (teneur en glace : environ 12 %). Le bloc inférieur (A) est composé de sable et de gravier grossiers avec des cailloux arrondis. Aucune glace n'a pu être observée dans ce bloc car la chaleur générée lors du carottage a fait dégeler le sol et le matériau a fini par être remanié. Cette séquence de sédiments est interprétée comme un dépôt deltaïque formant un delta marin postglaciaire. Ces observations sont cohérentes avec l'histoire postglaciaire de la région décrite par St-Onge (2012). La température du sol des deux nouveaux forages sera relevée en juillet 2019 (une année complète de données), ce qui donnera un aperçu des conditions actuelles du pergélisol dans la région.

### Études par géoradar

Le géoradar a permis d'obtenir des renseignements sur la subsurface à une plus grande profondeur que les données de cartographie et de forage. Sur les images du géoradar, une couche irrégulière a été observée à des profondeurs allant de 0,5 à 1,5 m, ce qui représente le contact entre le front de dégel (c'est-à-dire le fond de la couche non gelée) et le sol gelé en dessous (Figure 4). Les réflexions hyperboliques proches de la surface, plus ou moins également espacées dans le profil du géoradar, sont interprétées comme étant des coins de glace. Au total, 79 coins de glace ont été détectés sous le nouveau sentier proposé et 30 % d'entre eux étaient visibles depuis la surface du sol pendant l'enquête. Dans la plupart des cas, il n'y avait pas de dépressions, de crêtes ou de fissures visibles à la surface du sol.

Les coins de glace ont une largeur d'environ 3 à 6 m au niveau de la limite du pergélisol. Les sommets des coins de glace sont situés à environ 1 à 1,5 m sous la surface du sol s'étendant jusqu'à au moins 4 m de profondeur. L'étendue verticale maximale des coins de glace reste inconnue car la pénétration maximale du signal était d'une profondeur de 4 m. Les positions des coins de glace observées sur les profils du géoradar correspondaient aux dépressions des coins de glace qui délimitent les polygones visibles sur l'image satellite à haute résolution (Figure 4). Cela confirme donc que le sentier de VTT repose sur de nombreux coins de glace. Cette forte teneur en glace rend la région d'étude très vulnérable au thermokarst et à l'érosion thermique. En outre, de nombreux ravins ont été observés dans la région et beaucoup d'entre eux présentent des signes d'érosion thermique active. Il a également été observé que l'érosion et le recul du haut des escarpements des glissements de terrain sont contrôlés par la configuration des coins de glace dans le pergélisol. Toute perturbation future du régime thermique de la surface du sol, telle que le défrichage de la végétation, l'augmentation de l'accumulation de neige ou d'eau, ou l'augmentation de la température annuelle moyenne de l'air, pourrait potentiellement entraîner une dégradation supplémentaire du pergélisol et le tassement du sol provoqué par le dégel. En conséquence, le PN&SP construit un nouveau segment de promenade flottante en bois d'environ 3,2 km de long et 2,4 m de large. Les travaux ont commencé en 2019 et devraient s'achever en 2020. Ce nouveau tracé de promenade contribuera à réduire les effets cumulés des VTT sur la végétation et les sols (c'est-à-dire l'enlèvement de la végétation et le compactage de la couche de tourbe), qui créent un déséquilibre du régime thermique de la couche active ainsi que du pergélisol.

### Activités de formation et de sensibilisation

Au cours des deux dernières années, les membres de l'équipe de projet ont également organisé et participé à de nombreuses activités de sensibilisation pour communiquer des informations et tenir les membres de la communauté au courant des avancées du projet (Figure 5). L'objectif de ces activités était de sensibiliser la population locale au pergélisol et aux risques potentiels liés aux changements climatiques. Parmi les événements et les activités entrepris au cours du projet, citons :

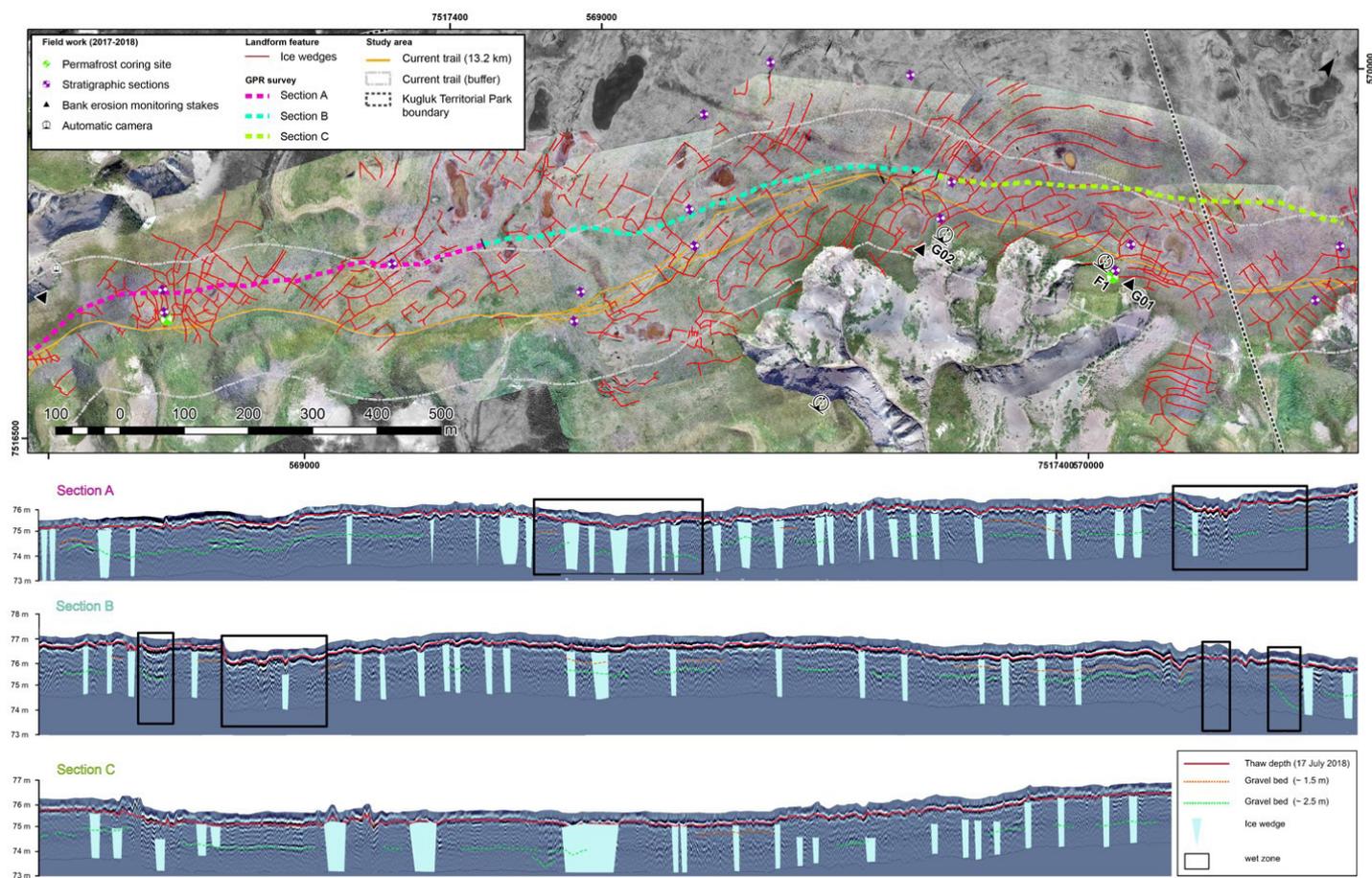


Figure 4 : Photo aérienne avec tous les coins de glace numérisés, et le profil géoradar du nouveau sentier de VTT proposé et l'interprétation des coins de glace.

- **Réunions du CJPMC du Kugluk :** Quatre réunions ont été organisées avec le CJPMC de Kugluk pour discuter des objectifs et de la conception du projet et pour offrir un retour d'information et des résultats à mesure que les étapes clés étaient franchies. L'objectif de ces réunions était de veiller à ce que les priorités et les préoccupations du comité soient correctement prises en compte tout au long du projet.
- **Journée des parcs du Nunavut :** En 2017, des membres de l'équipe de projet ont participé à la Journée des parcs du Nunavut et ont expliqué le projet à l'aide de cartes et d'images satellites. En outre, de nombreux membres de la communauté ont partagé leurs observations sur l'état passé et actuel du paysage et sur la manière dont ces changements influencent la vie communautaire.
- **Participation à des conférences scientifiques :** Ce projet a été coprésenté à trois conférences scientifiques avec Frank Ikpakohak (aîné de la communauté), Darryl Havioyak (membre du conseil

d'administration de la CJMPC) et Larry Adjun (employé du PN&SP et président de la Hunters and Trappers Organization de Kugluktuk (HTO)). Lors de la conférence Arctic Change (11 au 15 décembre 2017), les membres de notre équipe ont participé à un documentaire sur l'adaptation au changement climatique dans l'ouest du Nunavut, qui a été présenté lors de l'expédition Arctic 2018 (Students on Ice).

- **Entrevues à la radio :** Les membres de l'équipe du projet ont participé à des entrevues à la station de radio locale pour parler des changements climatiques, des problèmes liés au pergélisol et communiquer les résultats de la recherche avec la communauté. Les membres de la communauté ont appelé et fait part de leurs expériences sur les changements climatiques et ont posé des questions sur le projet.

- **Soirées communautaires** : L'équipe a organisé trois soirées communautaires pour présenter le projet et recueillir les points de vue locaux sur les changements observés dans la région. Au cours de ces soirées, de courts documentaires sur les changements climatiques dans l'Arctique ont également été présentés.
- **Pergélisol 101** : Un cours d'introduction aux concepts de base du pergélisol a été proposé à divers participants du CJPMC de Kugluk, du HTO, de l'association inuite de Kitikmeot (KIA) et du hameau de Kugluktuk.

## Travaux futurs

La prochaine phase (2019-2020) de ce projet communautaire évaluera la sensibilité du pergélisol le long de la nouvelle route qui donnera accès au parc depuis la communauté de Kugluktuk. Des études supplémentaires au moyen de géoradars et de véhicules aériens sans pilote seront menées le long de cette nouvelle route afin de caractériser les conditions du pergélisol. Ces résultats permettront d'évaluer la sensibilité au dégel et les impacts potentiels futurs

le long de la route. En outre, une priorité essentielle sera de former des surveillants communautaires au sein de la communauté pour leur permettre de poursuivre les activités de surveillance du pergélisol dans le parc (c'est-à-dire l'analyse et l'interprétation des données de température du sol, la maintenance des enregistreurs de données). Des membres de l'équipe de projet aimeraient organiser des sessions de formation supplémentaires au cours de l'année prochaine à la Station canadienne de recherche dans l'Extrême-Arctique (SCREA) à Cambridge Bay, au Nunavut, et au CEN à Québec, au Québec. Comme les années précédentes, l'équipe organisera et participera à une variété d'événements qui impliqueront les jeunes et dans lesquels les membres de la communauté seront invités à rencontrer l'équipe et à en apprendre davantage sur le projet. Ce projet de recherche continuera à placer la communauté dans un rôle de leader dans l'évaluation et la réponse aux changements environnementaux qui se produisent déjà et veillera à ce que les voies de transport semi-permanentes soient plus durables et plus résistantes aux changements climatiques et au dégel du pergélisol.



Figure 5 : Activités de sensibilisation et de formation : a) Réunion du CJPMC de Kugluk ; b) Journée des parcs du Nunavut ; c) Entrevue donnée par Michel Allard à la station de radio locale ; d) Forage dans le pergélisol ; e) Des jeunes effectuent des études cinématiques en temps réel pour cartographier les berges des rivières ; f) Des jeunes et le personnel du PN&SP utilisent la station de surveillance et téléchargent des données sur la température.

## Conclusions

Ce projet de recherche a permis de mieux comprendre comment le pergélisol sensible au dégel compromet le sentier de VTT dans le parc territorial de Kugluk. Les travaux préliminaires démontrent que :

1. Les polygones de coin de glace sont bien développés dans la région. Ce paysage de pergélisol riche en glace pourrait être touché par la subsidence du dégel et l'érosion thermique. Cette situation peut être causée par des processus naturels dans un contexte de réchauffement climatique ou par des activités humaines (par exemple, perturbation de la surface par des véhicules hors route).
2. La majorité des lacs et des étangs thermokarstiques sont en expansion active et la formation de nouveaux étangs est le résultat de la dégradation du pergélisol. L'analyse de l'abondance et de la superficie des lacs sur la période de 60 ans couverte par l'étude révèle une dégradation naturelle du pergélisol dans la zone étudiée, et pas seulement le long du sentier.
3. Le sentier est marqué par la présence de nombreuses dépressions profondes causées par la fonte du sommet des coins de glace provoquant un affaissement différentiel du sol. Il en résulte souvent une accumulation d'eau et une plus grande accumulation de neige, ce qui peut accélérer encore la dégradation du coin de glace.
4. Le dégel des coins de glace a causé le développement de ravines et a modifié les modèles d'érosion des berges dans le parc.
5. L'augmentation des températures de l'air et du sol devrait accroître la dégradation des coins de glace. Compte tenu des projections climatiques futures, il est important de déterminer les zones où le pergélisol est riche en glace afin de prévoir quelles sections du sentier sont les plus sensibles aux dommages causés par le dégel du pergélisol. L'adoption de bonnes pratiques de planification et de gestion, telles que la construction d'une promenade de bois, aidera à minimiser ou à prévenir les perturbations du terrain le long du nouveau sentier.
6. Il est essentiel d'impliquer les membres des communautés dans la recherche sur le pergélisol afin de leur permettre de mieux documenter les changements du pergélisol et du paysage, et de s'adapter aux changements climatiques. Pour faciliter la participation de la communauté aux efforts de recherche, de surveillance et d'adaptation, ce projet met l'accent sur le renforcement des capacités par la formation et la mise à disposition d'information sur le pergélisol.

## Remerciements

Le soutien financier pour ce projet a été offert par le Programme : Se préparer aux changements climatiques dans le Nord de Relations Couronne-Autochtones et Affaires du Nord Canada. Nous remercions tout particulièrement le personnel du PN&SP pour ses conseils sur le choix du site et l'installation des instruments, ainsi que pour l'entretien continu des sites de surveillance et la collecte des données. Nous sommes reconnaissants à OJ Berhardt, Andrew Jack Atatahak, Zachary Kunana, Kevin Kamoayok, Aili Pedersen, Alysha Maksagak, Jennifer Kilabuk, Joanna MacDonald et Sara Holzman pour leur aide dans ce projet. Nous souhaitons également remercier Frank Ipkahak, les membres de la communauté de Kugluktuk et le CJPMC de Kugluk pour leur intérêt pour le projet et leur précieuse connaissance du paysage qui ont été essentiels à la réussite de ce projet.

## Références

Allard M., Lemay M., Barrette C., et al. 2012. Permafrost and climate change in Nunavik and Nunatsiavut: Importance for municipal and transportation infrastructures. In: Nunavik and Nunatsiavut: from science to policy. An integrated regional impact study (IRIS) of climate change and modernization, edited by M. Allard and M. Lemay. ArcticNet Inc., Quebec City, Quebec. pp 171–197.

AMAP. 2017. Snow, water, ice, permafrost in the Arctic (SWIPA). Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway.

Bush, E., Lemmen, D.S. (eds.) 2019. Canada's Changing Climate Report. Government of Canada, Ottawa, Ontario. 444 p. Retrieved from: <https://www.changingclimate.ca/CCCR2019> [accessed April 1, 2019].

- Doré, G., Niu, F., Brooks, H. 2016. Adaptation Methods for Transportation Infrastructure Built on Degrading Permafrost. *Permafrost and Periglacial Processes*, 27(4):352–364. doi: 10.1002/ppp.1919.
- Dredge, L.A. 2001. Where the river meets the sea: geology and landforms of the lower Coppermine River valley and Kugluktuk, Nunavut. Geological Survey of Canada, Miscellaneous Report 69, Ottawa, Ontario.
- Environment and Climate Change Canada. 2019. Canadian Climate Normals, Kugluktuk Station Data. Retrieved from: [http://climate.weather.gc.ca/climate\\_normals](http://climate.weather.gc.ca/climate_normals) [accessed Jan 20, 2019].
- Ford, J.D., Clark, D., Pearce, T., et al. 2019. Changing access to ice, land and water in Arctic communities. *Nature Climate Change*, 9:335–339. doi: 10.1038/s41558-019-0435-7.
- Fortier, D., Allard, M. 2004. Late Holocene syngenetic ice-wedge polygons development, Bylot Island, Canadian Arctic Archipelago. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 41(8):997–1012. doi: 10.1139/e04-031.
- French, H., Shur, Y. 2010. The principles of cryostratigraphy. *Earth-Science Reviews*, 101(3):190–206. doi: 10.1016/j.earscirev.2010.04.002.
- Gilbert, G.L., Kanevskiy, M., Murton, J.B. 2016. Recent Advances (2008–2015) in the Study of Ground Ice and Cryostratigraphy. *Permafrost and Periglacial Process*, 27(4):377–389. doi: 10.1002/ppp.1912.
- Hinkel, K.M., Doolittle, J.A., Bockheim, J.G., et al. 2001. Detection of subsurface permafrost features with ground-penetrating radar, Barrow, Alaska. *Permafrost Periglacial Process*, 12(2):179–190. doi: 10.1002/ppp.369.
- Hjort, J., Karjalainen, O., Aalto, J., et al. 2018. Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by mid-century. *Nature Communications*, 9:5147. doi: 10.1038/s41467-018-07557-4.
- Jørgensen, A.S., Andreasen, F. 2007. Mapping of permafrost surface using ground-penetrating radar at Kangerlussuaq Airport, western Greenland. *Cold Regions Science and Technology*, 48(1):64–72. doi: 10.1016/j.coldregions.2006.10.007.
- Kerr, D.E., Dredge, L.A., Ward, B.C. 1997. Surficial geology, Coppermine (east half), District of Mackenzie, Northwest Territories. Retrieved from: <https://geoscan.nrcan.gc.ca/starweb/geoscan/servlet.starweb?path=geoscan/fulle.web&search1=R=209395>. doi:10.4095/289237.
- Kneisel, C., Hauck, C., Fortier, R., Moorman, B. 2008. Advances in geophysical methods for permafrost investigations. *Permafrost and Periglacial Processes*, 19(2):157–178. doi: 10.1002/ppp.616.
- LeBlanc, A.-M., Short, N., Oldenborger, G.A., et al. 2012. Geophysical Investigation and InSAR Mapping of Permafrost and Ground Movement at the Iqaluit Airport. In: *Cold Regions Engineering*. American Society of Civil Engineers, Quebec City, Quebec. August 19–22, 2012, pp 644–654. doi: 10.1061/9780784412473.064.
- Nunavut Parks and Special Places. 2019. Kugluk (Bloody Falls) Territorial Park. Department of Environment, Government of Nunavut. Retrieved from: <https://nunavutparks.com/parks-special-places/kugluk-bloody-falls-territorial-park/> [accessed Jan 20, 2019].
- Prno, J., Bradshaw, B., Wandel, J., et al. 2011. Community vulnerability to climate change in the context of other exposure-sensitivities in Kugluktuk, Nunavut. *Polar Research*, 30(1):7363. doi: 10.3402/polar.v30i0.7363.
- Smith, S.L., Burgess, M.M. 2002. A digital database of permafrost thickness in Canada. Geological Survey of Canada, Open File 4173. doi: 10.4095/213043.
- St-Onge, D.A. 1988. Surficial Geology of Coppermine River, District of Mackenzie, Northwest Territories. Geological Survey of Canada, “A” Series Map 1645 A. Retrieved from: <https://geoscan.nrcan.gc.ca/starweb/geoscan/servlet.starweb?path=geoscan/fulle.web&search1=R=126431>. doi: 10.4095/126431.
- St-Onge, D.A. 2012. Late Wisconsinan Morphosedimentary Sequences of the Lower Coppermine River Valley, Nunavut and Northwest Territories. *Geoscience Canada*, 39(3):132–147.
- Wolfe, S.A. 2000. Permafrost research and monitoring stations in west Kitikmeot, Slave geological province, Nunavut. Geological Survey of Canada, Open File 3848. doi: 10.4095/211242.

# CONCEPTION D'UN VÉHICULE AÉRIEN SANS PILOTE FAIT PAR SOI-MÊME À DES FINS DE RECHERCHE ARCTIQUE ET DÉMONSTRATION DE SES CAPACITÉS AU MOYEN DE PRÉLÈVEMENTS D'ÉPAISSEUR DE NEIGE PAR UNE STRUCTURE EN MOUVEMENT.

**D. Kramer<sup>1,2\*</sup>, J. Meloche<sup>1,2</sup>, A. Langlois<sup>1,2</sup>, D. McLennan<sup>3</sup>, B. Chapdelaine<sup>4</sup>, C. Gauthier-Barrette<sup>1</sup>, A. Royer<sup>1,2</sup> et P. Cliche<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Centre d'Applications et de Recherches en Télédétection (CARTEL), Université de Sherbrooke, Québec, Canada

<sup>2</sup> Centre d'études nordiques, Québec, Canada

<sup>3</sup> Savoir polaire Canada, Station canadienne de recherche dans l'Extrême-Arctique, Cambridge Bay, Nunavut, Canada

<sup>4</sup> Institut interdisciplinaire d'innovation technologique, Sherbrooke, Québec, Canada

\* [Daniel.kramer@usherbrooke.ca](mailto:Daniel.kramer@usherbrooke.ca)

## Résumé

Les véhicules aériens sans pilote (UAS) sont devenus monnaie courante dans de nombreuses applications scientifiques, y compris lors d'opérations dans des conditions environnementales difficiles. Toutefois, les UAS disponibles sur le marché capables de ce type de travail sont très coûteux et n'offrent qu'une flexibilité limitée pour le transport de charge personnalisée. Il est nécessaire d'avoir des systèmes de UAS rentables et personnalisés pour l'exploration des sites, la cartographie, les relevés et le profilage atmosphérique dans l'Arctique. L'objectif de ce projet était de développer une plateforme de construction faite soi-même, à partir de composants simples et préfabriqués capables d'effectuer des opérations de vol dans les conditions extrêmes de l'Arctique et de l'hiver polaire. Cette approche permet de faire voler toute une gamme de charges utiles d'instruments de détection destinés à différentes utilisations et d'effectuer facilement des modifications sur place et des réparations à faible coût. Le radar bande Ka utilisé par l'équipe de recherche (environ 700 grammes (g), 200 x 130 x 150 millimètres

(mm)) est un exemple de charge utile extrêmement adaptable. D'autres exemples plus courants sont les caméras comme la MAPIR Survey 3 (environ 50 g, 59 x 41,5 x 36 mm). Lorsque certaines garanties de fabrication (comme celle du senseFly) exigent que le UAS soit envoyé au fabricant même pour des réparations mineures, les modifications et réparations sur place peuvent permettre de maintenir un faible coût d'exploitation d'un UAS fabriqué soi-même.

Pour atteindre cet objectif, différents composants ont été testés dans des conditions contrôlées afin de vérifier leur fonctionnalité dans des températures extrêmement froides et leur compatibilité avec les dispositifs utilisés lors du travail sur le terrain. En vue de valider la capacité scientifique de la conception du système de UAS faite soi-même, une petite zone près de Cambridge Bay (Nunavut, Canada) a été étudiée pour y prélever une épaisseur de neige à l'aide d'une structure en mouvement. Cette étude a permis d'obtenir une carte de l'épaisseur de la neige avec une résolution

Référence suggérée :

Kramer, D., Meloche, J., Langlois, A., McLennan, D., Chapdelaine, B., Gauthier-Barrette, C., Royer, A., Cliche, P. 2019. Conception d'un véhicule aérien sans pilote fait par soi-même à des fins de recherche arctique et démonstration de ses capacités au moyen de prélèvements d'épaisseur de neige par une structure en mouvement. *Aqhaliat* 2019, *Savoir polaire Canada*, p. 41-60. DOI: 10.35298/pkc.2019.05

horizontale de 6 cm. La profondeur de neige calculée, avec un écart-type de 16 centimètres (13 cm sans les points sur la végétation), correspond aux valeurs trouvées dans la littérature qui ont été prélevées à des latitudes plus basses au moyen de plateformes beaucoup plus coûteuses. Le principal type de UAS étudié dans ce projet peut fonctionner en toute sécurité à des températures aussi basses que -40 degrés Celsius (°C) et à des températures encore plus froides, mais avec des capacités légèrement réduites. La conception des UAS fait soi-mêmes est actuellement limitée à une vitesse de vent maximale de 10 mètres par seconde (m/s), ce qui comprend une grande marge de sécurité. Les prochaines étapes comprennent le développement d'un aéronef à voilure tournante pour transporter un système radar capable de profiler la neige et la glace et un aéronef à voilure fixe pouvant voler à des vitesses de vent supérieures à 10 m/s.

## Introduction

Les UAS sont fréquemment utilisés dans de nombreux domaines géoscientifiques (Anderson et al., 2019) et dans le cadre de recherches arctiques (Chudley et al., 2019). Les utilisations scientifiques en Arctique bénéficieront grandement des possibilités offertes par les UAS. Par exemple, les méthodes traditionnelles de prélèvement de la profondeur de la neige (Langlois et al., 2010), comme les mesures manuelles avec une sonde à avalanche ou le creusement d'un puits à neige, prennent beaucoup de temps et sont limitées à une petite zone, ce qui entraîne des problèmes de représentativité. Les UAS peuvent couvrir une zone beaucoup plus grande (Jo et Kwon, 2019), éviter l'interpolation spatiale et peuvent facilement suivre les changements dans une zone au fil du temps (par exemple, la végétation). En outre, en représentant mieux les processus locaux (distribution de la neige par rapport à la rugosité/topographie) qui sont difficiles à représenter avec la résolution spatiale plus grossière des images satellites, les UAS peuvent également réduire les incertitudes de la modélisation (Rutter et al., 2014).

La technologie des UAS se développe rapidement et devient de plus en plus facile à utiliser. Néanmoins, les conditions environnementales difficiles des régions polaires exercent une pression considérable sur les

aéronefs, ce qui peut constituer un défi pour trouver des solutions simples et facilement accessibles (DJI, 2015). En outre, ces systèmes sont souvent fermés et ne permettent pas de modifier les paramètres ou de procéder facilement à l'entretien et à la réparation sur place. Les systèmes de pointe, comme le senseFly eBee ou le Microdrones md4-3000, peuvent mieux gérer des conditions environnementales difficiles, mais leur prix, qui peut dépasser 30 000 \$ US, peut être prohibitif. En outre, ces systèmes de pointe ne permettent généralement pas de modifier les charges utiles ou d'attacher des systèmes ou des capteurs pour des besoins scientifiques précis. La construction fait soi-même constitue un substitut à ces systèmes. Elle permet d'effectuer des modifications précises sur un aéronef pour qu'il puisse accomplir la tâche désirée. Cette méthode permet également d'effectuer facilement des réparations et des modifications pendant les campagnes sur le terrain pour résoudre les problèmes qui surviennent. Un avantage supplémentaire est la possibilité de réutiliser les composants électroniques dans différents UAS, ce qui réduit considérablement le prix des nouveaux aéronefs puisqu'un nouveau cadre peut généralement être acheté pour moins de 200 \$ US.

La philosophie qui sous-tend la partie technique de cet article est de construire des UAS simples et peu coûteux pouvant fonctionner dans l'Arctique et répondant aux normes scientifiques en matière de précision des prélèvements en surface. On a pris soin d'éviter les procédures compliquées avec les autorités de l'espace aérien, en l'occurrence Transports Canada (TC). Le choix du site et des tâches ont été conçus pour répondre à toutes les dispenses de Transports Canada (par exemple, la distance par rapport aux zones bâties, la classe d'espace aérien, et les altitudes et distances de vol). Bien que cette conception limite les possibilités de vol, elle évite le temps d'attente associé à la demande et à l'obtention de certificats d'opérations aériennes spéciales (COAS)<sup>1</sup> et permet de prendre des décisions de dernière minute fondées sur des données scientifiques concernant les besoins de vol.

Pour démontrer que cette approche peut répondre aux normes scientifiques en matière d'acquisition de données, cet article vise à fournir :

<sup>1</sup> La réglementation de Transports Canada a changé à compter du 1er juin 2019. Les restrictions en place pendant le projet ne sont plus en vigueur. La nouvelle réglementation qui sera en vigueur pour les futures missions de vol peut être : <https://www.tc.gc.ca/en/services/aviation/drone-safety/new-rules-drones.html>.

- Des détails techniques sur la méthode du projet, y compris des renseignements sur le matériel et les logiciels, et les leçons tirées des campagnes précédentes.
- Un exemple d'utilisation en prélevant la profondeur de la neige à l'aide d'une structure en mouvement, validé par des mesures sur le terrain.

Par conséquent, le présent article est divisé en deux rubriques principales : Tout d'abord, une description des solutions techniques, des expérimentations et des expériences d'utilisation d'un UAS dans l'Arctique, puis une démonstration des capacités de la conception du système de UAS fait soi-même pour prélever l'épaisseur de la neige dans l'Arctique.

## Développement et aperçu de l'UAS

Cette rubrique aborde les configurations des différents aéronefs et l'incidence de l'environnement sur les matériaux et les composants électroniques. Certaines expériences ont été menées dans un environnement contrôlé (chambre météorologique), tandis que d'autres tests et observations ont été effectués lors du travail sur le terrain. Notons que le fait de travailler près du pôle géomagnétique (par exemple, Cambridge Bay, 1 500 kilomètres (km)) en utilisant un magnétomètre peut causer des problèmes de vol pour les UAS. Il peut être nécessaire de passer en mode de vol manuel, car la plupart des UAS utilisent un magnétomètre pour déterminer le cap lorsqu'ils volent en pilote automatique. Les aéronefs à voilure tournante ou multicoptères reposent fortement sur les magnétomètres pour s'orienter en raison de leur capacité à voler en mode stationnaire ou à basse vitesse. En comparaison, les aéronefs à voilure fixe peuvent prévoir leur direction uniquement à partir du suivi de la navigation ponctuelle du précédent système de positionnement mondial (GPS) (Ader and Axelsson, 2017). Cimoli et al. (2017) ont utilisé une voilure tournante dans l'Arctique et ont produit un bref rapport sur leur expérience : « *La navigation au GPS et à la boussole est compromise à haute latitude (en raison des interférences du champ magnétique) [...]. Les pilotes devraient être préparés à réaliser la levée en mode manuel.* »

D'après des expériences personnelles et des rapports de collègues, des envolées sur des trajectoires

aléatoires se sont produites avec les anciennes versions des produits DJI. Avec les versions plus récentes, le pilote automatique passe automatiquement en mode *maintien de l'altitude/manuel* lorsqu'il essaie de voler *en mode complètement automatique complet ou GPS*. Bien que le vol manuel soit possible, des compétences de vol très avancées sont nécessaires pour obtenir de bonnes mesures des capteurs installés sur le UAS. Par exemple, si une approche par structure en mouvement est prévue, l'angle, la vitesse et la synchronisation des caméras doivent être contrôlés pour assurer un chevauchement suffisant entre les photographies. Une autre solution serait d'enregistrer des vidéos plutôt que de prendre des photographies. Cependant, cette solution nécessite un post-traitement plus intensif et diminue la résolution des images.

Pour les besoins de ce projet, il a été décidé de n'utiliser le GPS que pour la navigation à bord de l'aéronef et d'avoir en plus recours à l'étalonnage du pilote automatique. Pour cette raison, la conception du UAS fait soi-même utilise un cadre à ailes fixes. Le pilote automatique peut être utilisé sans magnétomètre et les aéronefs à voilure fixe sont mieux adaptés pour des temps de vol plus longs, ce qui est bon pour la cartographie. Un aéronef Phantom 3 Professional de DJI a également été utilisé à plusieurs reprises en mode manuel à des fins de comparaison.

## Batteries

La section suivante décrit les tests de batterie qui ont été effectués pour identifier les temps de vol potentiels selon différentes conditions de température. L'objectif de ces essais était de mieux comprendre les performances des batteries, par exemple, leur durée de vie pour une certaine charge, indépendamment du type de UAS utilisé, de la vitesse du vent ou d'autres facteurs. La connaissance des performances des batteries est un aspect important de la planification des missions de vol car elle influe les décisions concernant notamment les lignes de vol, la zone de couverture et le temps de vol prévu en fonction des conditions météorologiques du moment. Les batteries LiPO ont été choisies pour la flotte utilisée dans ce projet. Ces batteries sont largement utilisées pour les UAS, car elles offrent [Traduction] « le compromis optimal entre une charge spécifique modérée, une puissance massique élevée et une durée de vie élevée » (Abdilla et al., 2015 ; Mulgaonkar et al., 2014). L'objectif à long terme est de

couvrir des distances similaires à celles des UAS offerts sur le marché (par exemple, 1000 m<sup>2</sup>), tout en étant capable de changer de charge utile sur place.

### Mise en place des tests

La consommation d'énergie a été estimée en analysant un véritable journal de bord d'un aéronef à voilure fixe (BlitzRCWorks Skysurfer Pro, voir figure 5, à gauche) ne transportant aucune charge utile. Le vol s'est déroulé dans de bonnes conditions (< vent de 10 mètres par seconde (m/s), environ 0 degré Celsius (°C)). L'ampérage (A) utilisé pendant le vol a varié entre 1 A et 25 A, et l'essentiel de l'énergie a été consommée pendant le décollage et la montée. En vol plané, presque aucune puissance n'était nécessaire, de sorte qu'une charge moyenne de 16 A a été calculée pour reproduire la consommation « normale » du vol. Le tableau 1 énumère les batteries testées. La décharge constante fait référence à la vitesse à laquelle la batterie peut se décharger, sans arrêt, sans être endommagée. La décharge de pointe désigne la capacité de la batterie à décharger une quantité plus importante que la décharge constante sur une courte période de temps. Le schéma de l'expérience est présenté à la figure 1.

### Types de tests et protocole

Trois types de tests ont été réalisés.

**Premier type de test :** Pendant le test, une charge élevée constante (16 A) a été appliquée à une température spécifique. La batterie test a préalablement été conservée à température ambiante pour simuler le maintien d'une batterie chaude (par exemple, près du corps) lors d'une sortie sur le terrain.

**Deuxième type de test :** La batterie test a d'abord été gelée à une température spécifique pour simuler son

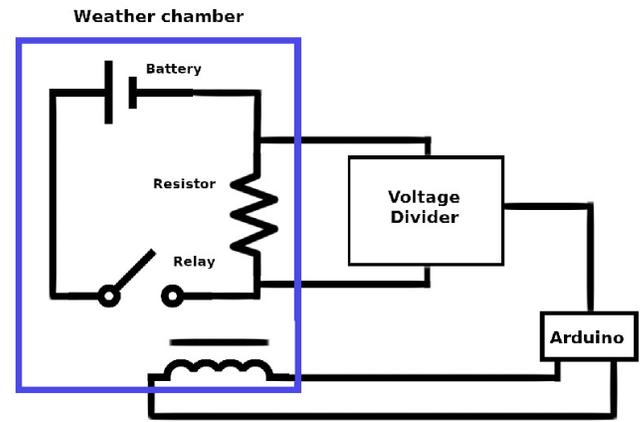


Figure 1 : Mise en place expérimentale.

transport sur le terrain, sans protection thermique. Tout comme pour le premier type de test, la charge appliquée était de 16 A.

**Troisième type de test :** Pendant le test, une petite charge faible (1 A) a été appliquée pour étudier l'effet des températures froides sur la durée de vie des batteries. La batterie test a préalablement été conservée à température ambiante.

Le protocole suivant a été utilisé pour normaliser les tests :

1. Toutes les parties du circuit sont connectées, et deux congélateurs sont utilisés. Le premier, dans lequel une batterie est insérée, est maintenu à une température constante. L'autre a été réglé à -80 °C pour refroidir la charge (plusieurs résistances). Les résistances sont contrôlées par un microcontrôleur Arduino, qui est connecté à un relais. Les résistances sont utilisées pour simuler la charge appliquée pendant un vol.

Tableau 1 : Batteries utilisées lors de l'expérience. Toutes les batteries ont 4 cellules.

Batterie	Milliampères par heure (mAh)	Volts (V)	Watts par heure (Wh)	Cote C de décharge constante	Cote C de décharge de pointe
Phantom 3	4480	15.2	68	S.O.	S.O.
Nano-tech 4.0 (Turnigy)	4000	14.8	59.2	30 C	40 C (10s)
Multistar 4.0 (Turnigy)	4000	14.8	59.2	12 C	24 C
Multistar 5.2 (Turnigy)	5200	14.8	76.96	12 C	24 C

- Lors des tests de types 1 et 2, le congélateur était réglé et maintenu à une température souhaitée. La température variait de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ce qui reflète les conditions normales du travail sur le terrain. Les tests ont été effectués à des intervalles de  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Les résultats de l'essai de type 3 allaient de  $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- Une batterie complètement chargée a été placée dans le congélateur et connectée au circuit. Les piles ont toujours été placées dans la même position, orientation et partie du congélateur pour éviter que des facteurs aléatoires n'influencent les résultats.
- Au début, après environ 350 secondes, et à la fin de chaque test, la résistance (R) a été mesurée pour vérifier que la charge demeurait constante et qu'il n'y avait pas de dysfonctionnement de la résistance.
- Pour éviter d'endommager la batterie, le système s'arrête automatiquement lorsque la batterie atteint  $12,6\text{ volts (V)}$  ( $3,15\text{ V}$  par cellule). Des explications plus détaillées seront données dans la rubrique Résultats.
- Pour chaque réglage, le test a été répété 3 fois par batterie (sauf pour le test de type 3, qui est expliqué plus en détail ci-dessous).

## Résultats des tests

Pour tous les tests, la R se situait dans une fourchette comprise entre  $0,93$  et  $0,98\ \Omega$ . La charge pendant les tests a donc été conforme à ce qui était prévu.

**Premier type de test :** La figure 2 compare la décharge des trois différents types de batteries à trois températures différentes. La batterie du Phantom 3 a tellement chauffé lors du premier test, que les autres tests avec cette batterie ont été interrompus. Lors de tests répétés, la performance de chaque batterie était relativement similaire, bien qu'il y ait des différences visibles entre les types de batterie. Comme les batteries perdent de leur résistance avec le temps, il est important de noter qu'aucun enregistrement des cycles des batteries n'a été conservé. Les Multistar 4.0 et 5.2 étaient presque neuves, et la Nano-tech 4.0 était utilisée depuis environ deux ans.

Le Multistar 5.2 possédait la plus grande capacité avec  $5\ 200$  milliampères par heure (mAh), tandis qu'à  $4\ 000\text{ mA}$ , le Multistar 4.0 et le Nano-tech 4.0 avaient la même capacité. La Multistar 4.0 et la Nano-tech 4.0 ont des cotes C différentes (appel de courant maximum de sécurité)—la cote de la Nano-tech est plus élevée ( $25$  à  $50\text{ C}$ ) que celle de la Multistar 4.0 ( $12\text{ C}$ ).

Les trois batteries ont connu une forte baisse de capacité à environ  $14,5\text{ V}$ . Dans la figure 3, chaque type de batterie est présenté dans son propre graphique, qui montre également les différentes températures. La Nano-tech 4.0 (graphique de gauche) est la plus sensible à la température. Elle perd environ 3 minutes de temps opérationnel à  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $7,35$  minutes) par rapport à  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $10,28$  minutes). Le Multistar 4.0 (graphique du milieu) perd un peu plus d'une minute de temps à  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $11$  minutes) par rapport à  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $12,16$  minutes). Le Multistar 5.2 (graphique de droite) perd presque exactement 1 minute de temps entre  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  et  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

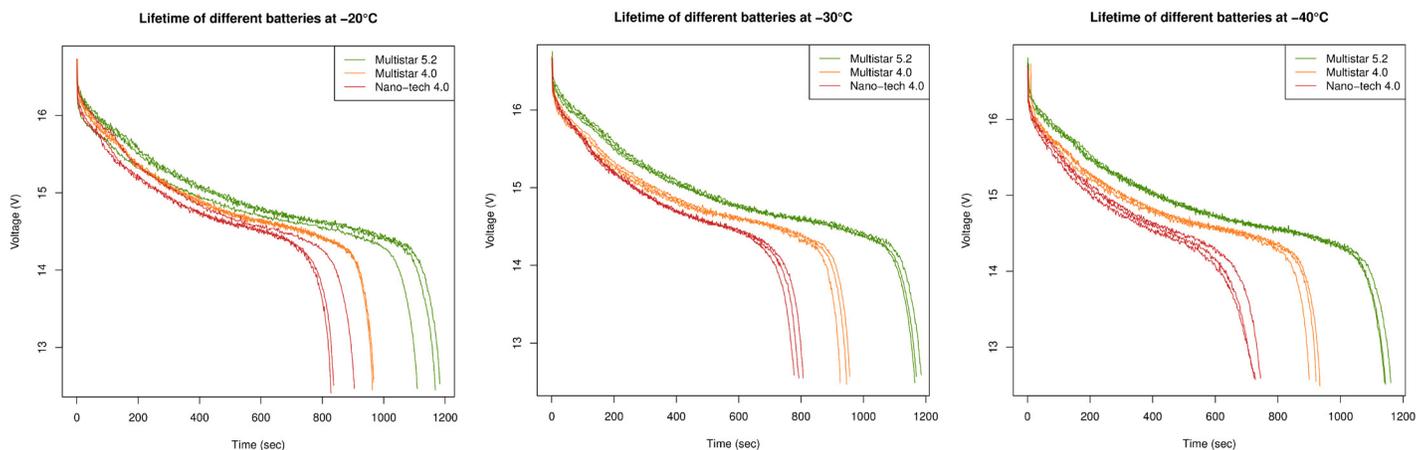


Figure 2 : Comparaison de trois différents types de batterie à trois températures différentes.

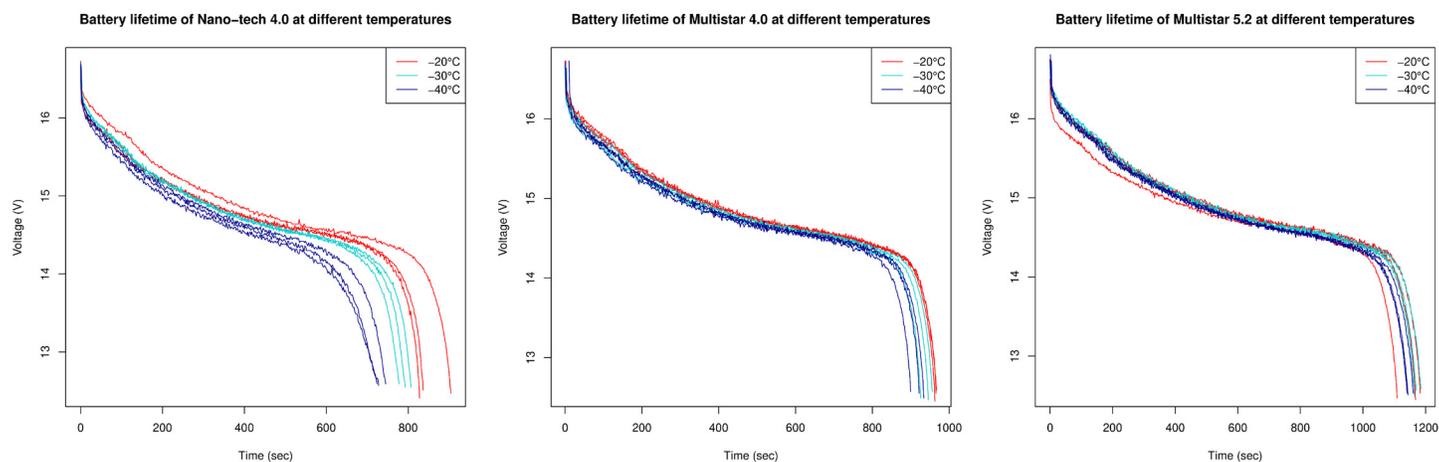


Figure 3 : Résultats de trois différents types de batterie à trois températures différentes.

Dans les trois cas, les résultats représentent des valeurs moyennes sur les trois tests effectués avec chaque batterie à chaque température.

**Deuxième type de test :** Le premier test a été effectué à  $-20^{\circ}\text{C}$  et la batterie a été exposée au froid pendant 30 minutes. Lorsque la charge a été appliquée, la tension est immédiatement passée sous 12,6 V. Comme il s'agissait de l'extrémité supérieure du test de température, aucun autre test n'a été effectué. Seule la Nano-tech 4.0 a été testé. On a présumé que d'autres batteries LiPo, bien qu'ayant peut-être une composition chimique légèrement différente, réagiraient de la même manière.

**Troisième type de test :** Le protocole décrit dans la section précédente a été répété à cinq températures différentes avec le Nano-tech 4.0 (voir figure 4). Le test à  $-8^{\circ}\text{C}$  a dû être réalisé dans des conditions réelles, à l'extérieur, la nuit, avec des températures variables. Au moment de l'essai, l'équipement n'a pas pu refroidir à une température supérieure à  $-20^{\circ}\text{C}$ . Pour la température à  $+4^{\circ}\text{C}$ , un réfrigérateur classique a été utilisé tandis que les autres tests ont été effectués dans une chambre climatique contrôlée. Les résultats présentés dans la figure 4 suggèrent que l'impact de la température sur la capacité de décharge est plutôt faible à  $-20^{\circ}\text{C}$ , mais un changement significatif peut être observé à des températures plus basses (à environ 50 minutes après le début de l'essai).

## Discussion

**Premier type de test :** L'âge de la batterie semble jouer un rôle important. La Nano-tech 4.0 est nettement moins performante que les autres, bien que ses caractéristiques soient comparables à celles de la Multistar 4.0. Le tableau 2 présente la durée moyenne de fonctionnement de chaque batterie pour chaque température (moyenne de trois essais). La tension a été mesurée et enregistrée tout au long du test ainsi qu'au le moment où la batterie a atteint 14,50 V pour la

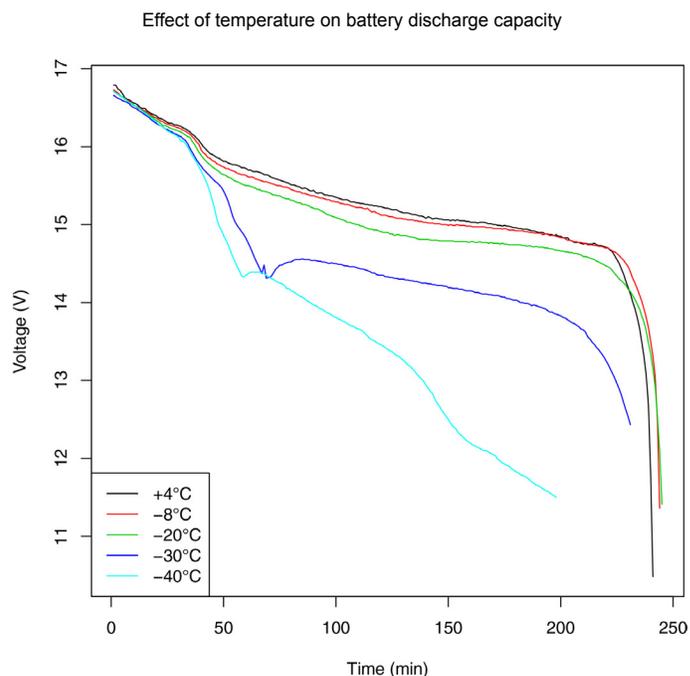


Figure 4 : Exposition à long terme d'une batterie (Nano-tech 4.0) à différentes températures. Il faut noter la nette diminution de la capacité de décharge à environ 50 minutes pour des températures de  $< -30^{\circ}\text{C}$ .

première fois. Les résultats sont similaires aux valeurs trouvées dans la littérature. Voir par exemple Winslow et al. (2016). Après cet intervalle, la capacité de la batterie diminue fortement. Pour éviter d'endommager la batterie, sa tension ne doit jamais descendre en dessous de 12 V, bien qu'un tampon supplémentaire de 0,5 V ait été intégré dans la conception du projet. Le 12 V est le résultat combiné de batteries à 4 cellules, chacune d'elle ayant une limite inférieure de 3 V. La cellule typique a une portée opérationnelle de 2,3 à 4,2 V (Salerno et Korsunsky, 1998), mais la règle du 3 V est une règle empirique largement utilisée car la chute du voltage n'est pas linéaire.

**Tableau 2 : Temps en secondes jusqu'à ce que la batterie atteigne 14,50 V. Peu après l'atteinte de cette valeur, les tensions de toutes les batteries chutent brusquement jusqu'à atteindre la limite de coupure de 12,5 V. La valeur affichée constitue la valeur moyenne de 3 tests.**

Température	Nano-tech 4.0	Multistar 4.0	Multistar 5.2
-20 °C	617 s	730 s	897 s
-30 °C	537 s	702 s	897 s
-40 °C	441 s	654 s	832 s

Ce test nous permet de mieux estimer les temps de vol, en supposant une charge constante. La charge utilisée pour les tests était suffisamment élevée pour sous-estimer plutôt que surestimer les temps de vol. Comme il a été mentionné, la différence entre le Nano-tech 4.0 et le Multistar 5.2 (et dans une certaine mesure le Multistar 4.0) est de près de 3 minutes par rapport à une température de -20 °C et de -40 °C, respectivement. Puisque la Nano-tech 4.0 est de loin la batterie la plus vieille, ce résultat suggère qu'il est raisonnable de répéter ce type d'expérience comme une « bonne habitude » avant un déploiement utilisant des batteries plus vieilles, pour assurer la navigabilité et estimer le temps de décharge. L'achat d'une nouvelle batterie n'est pas une grande dépense et pourrait améliorer considérablement la sécurité et le temps de vol.

**Deuxième type de test :** En raison des différentes compositions chimiques, cette valeur peut varier pour chaque type/fabricant de batterie. Les résultats des tests indiquent toutefois que la meilleure pratique consiste à garder les piles chaudes jusqu'au

dernier moment. Comme les sites de recherche sont généralement à  $\geq 30$  minutes des locaux, des mesures doivent être prises pour s'assurer que les piles restent chaudes jusqu'à leur utilisation.

**Troisième type de test :** Une différence a été constatée entre les mesures de tension prises à la fin de l'expérience et celles prises après avoir retiré la batterie de la chambre météorologique et l'avoir laissé réchauffer. Idéalement, la batterie devrait être testée sans charge dans les deux conditions. L'impédance de la batterie augmente à mesure que la température baisse (Wang, 2015). Ce phénomène démontre qu'une baisse de température entraîne une perte de capacité de décharge, qui est principalement causée par une augmentation de la résistance interne de la batterie, ce qui réduit le taux de décharge et la capacité (Wang, 2015). D'un point de vue pratique, la perte significative de la capacité de décharge entre -20 °C et -30 °C n'est pas particulièrement pertinente pour les besoins de ce projet de conception. Comme les durées de vol typiques sont inférieures à 50 minutes et que la charge typique de la batterie est plus élevée, la batterie serait vide avant que le froid n'ait un impact.

## Cadres

Diverses plateformes disponibles sur le marché ont été testées pour ce projet de conception, y compris deux plateformes à voilure fixe faites soi-même (toutes deux des motoplaneurs) et une plateforme à voilure tournante disponible sur le marché. Pour lancer les missions des UAS, des vols d'essai ont été effectués dans le cadre de diverses campagnes dans le sud de l'Ontario, au Nunavut et au Québec. Le prix initial de notre système à construire soi-même était d'environ 1 250 \$ US, ce qui est comparable au coût d'une solution d'entrée de gamme, comme le Phantom 3 Professional de DJI. Le Phantom 3 Professional de DJI a été utilisé pour représenter un système disponible sur le marché et une plateforme bien connue. Bien qu'il s'agisse d'un type différent de UAS (à voilure tournante) qui ne peut pas être comparé en tous points aux cadres à voilure fixe, il a servi de référence pour les tests.

Le Phantom 3 Professional de DJI a rapidement produit des résultats et a été un bon outil pour lancer les missions de UAS. Cet appareil a été utilisé dans la région de la baie de Quinte (sud de l'Ontario, Canada ; 44° 43' 06,5370"N, 77° 35' 46,6923"O) pour une campagne de cartographie de la neige en 2017 et dans le bassin

versant du lac Greiner près de Cambridge Bay (Nunavut, Canada ; 69°14'11,78 "N, 104°52'55,10 "O) lors d'une campagne estivale en 2018. Pendant la campagne de cartographie de la neige dans la baie de Quinte, le Phantom 3 Professional de DJI a connu quelques problèmes, mais il a pu voler en utilisant le réglage du pilote automatique. Malheureusement, il a été impossible d'utiliser le pilote automatique pendant la campagne estivale au bassin versant du lac Grenier. Nous supposons que la proximité relative du pôle Nord magnétique a perturbé les lectures du magnétomètre nécessaires à l'orientation et a obligé le pilote à voler manuellement.

La première plateforme faite soi-même construite et testée a été le BlitzRCWorks Skysurfer Pro. Cet aéronef n'avait pas de compartiment de charge utile et devait être adapté. Selon le fabricant, la masse en vol de l'aéronef est de 650 g. L'adaptation a nécessité d'ajouter 117 g pour la caméra (GoPro 6) et 485 g pour une batterie plus grande que nécessaire (Turnigy Nano-Tech 4.0). Par suite de ces modifications, la masse au décollage était de 1 252 g, ce qui a mis le moteur à la limite de ses capacités de propulsion. La conception personnalisée a permis de prélever des données et a été utilisée lors d'une campagne d'hiver et d'une campagne d'été à Cambridge Bay, ainsi que lors de vols d'essai dans la région de Sherbrooke (Québec, Canada).

Bien que la construction ait été facile, les vols d'essai ont permis d'identifier quelques problèmes, notamment le fait que le variateur de vitesse électronique du BlitzRCWorks Skysurfer Pro ne fonctionnait pas sous 0 °C. En raison de cette découverte, tous les composants électroniques ont été testés dans les chambres météorologiques, qui devaient initialement uniquement se concentrer sur les capacités de décharge des batteries. De plus, l'aéronef a une capacité de charge utile très limitée et, faute d'expérience préalable, la batterie la plus puissante qui puisse y être installée a été utilisée pour assurer une puissance suffisante pendant le vol. Les avantages de la plateforme BlitzRCWorks Skysurfer Pro sont son faible prix (environ 75 \$ US pour le cadre) et ses propriétés en vol plané. Il est facile à piloter et constitue une excellente plateforme pour les pilotes inexpérimentés. Cependant, les planeurs ont des problèmes en cas de vents plus forts (la vitesse maximale du vent jugée sûre lors des essais était de 10 m/s).

La seconde plateforme faite soi-même construite et testée a été la Finwing Penguin (environ 220 \$ US). Cet aéronef a un compartiment de charge utile dédié (avec quelques modifications, il peut s'adapter à un Sony A6000, poids : 468 g, dimension : 120 x 67 x 45 mm) et peut transporter jusqu'à 900 g de charge utile (instructions du fabricant). Le poids total de l'aéronef ne doit pas dépasser 2,4 kilogrammes. La construction de cet aéronef a été facile et rapide. Par rapport au BlitzRCWorks Skysurfer Pro, qui était également à son poids maximal, le Pingouin Finwing semblait voler plus facilement. Ses pièces sont plus robustes que celles du BlitzRCWorks Skysurfer Pro et l'aéronef a donné de meilleurs résultats lors des essais. Puisqu'il s'agit d'un planeur, les vents forts demeurent un problème, mais il était encore facile de le faire voler dans des vents de 10 m/s (vent à 2 m d'altitude, n'a pas été mesuré à une altitude supérieure de 50 à 70 m) en mode de vol assisté et son contrôle était acceptable en mode de vol manuel.

Un résumé des avantages et des inconvénients des différentes plateformes faites soi-même testées figure dans le tableau 3. La figure 5 montre des photos des différentes plateformes.

### Composants électroniques

Les composants électroniques sont exposés au froid pendant le transport vers le site et les vols eux-mêmes. Pour garantir le bon fonctionnement d'un aéronef dans des conditions de froid, tous les composants

Tableau 3 : Avantages et inconvénients des plateformes de UAS disponibles sur le marché testées.

	DJI Phantom 3 Professional	BlitzRCWorks Skysurfer Pro	Finwing Penguin
Inconvénients	Disponible sur le marché	Bon marché	Facile à piloter
	Rapport prix/performance	Facile à piloter	Baie de chargement
	Résultats rapides		Un moteur plus fort
Avantages	Système fermé	Capacité limitée de la charge utile	Légèrement plus cher
	Difficultés liées aux températures froides	Sous-pouvoirs	Capacité limitée de la charge utile
		Difficultés dans le vent	



Figure 5 : De gauche à droite : BlitzRCWorks Skysurfer Pro, Finwing Penguin, intérieur du Finwing Penguin, et le DJI Phantom 3 Professional.

électroniques ont été testés dans un congélateur contrôlé. Il s'agit d'un test distinct de celui des batteries, puisque celles-ci sont entreposées dans des conditions chaudes. Pour les expériences, les pièces électroniques ont été laissées dans le congélateur à la température indiquée pendant au moins une heure. La figure 6 montre le câblage des composants électroniques testés.

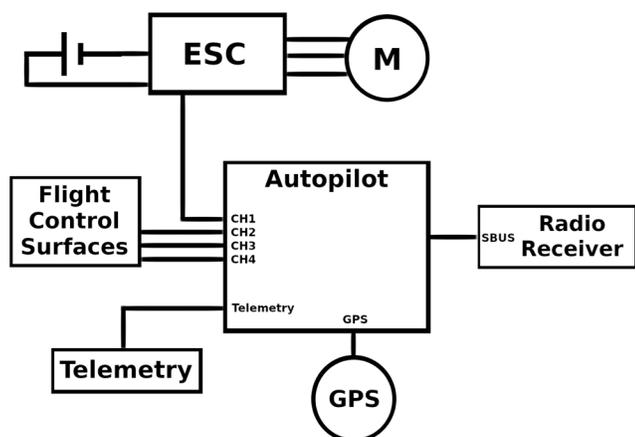


Figure 6 : Schéma de câblage des composants électroniques des modèles de UAS à construire soi-même.

Ce test n'a pas été réalisé pour la DJI Phantom 3 Professional (la plateforme de référence, disponible sur le marché), car sa portée opérationnelle a été fournie par le fabricant (DJY, 2015). Le tableau 4 présente le UAS X-UAV Talon à titre de référence, mais cette plateforme n'a pas encore été utilisée sur le terrain. Les caméras n'ont pas non plus été testées, car elles ne sont pas indispensables à la sécurité des vols.

## Résultats et discussion

Comme le montre le tableau 4, la plage de température opérationnelle des aéronefs diffère. Comme le BlitzRCWorks Skysurfer Pro a cessé de fonctionner à  $-5^{\circ}\text{C}$ , les tests n'ont pas été poursuivis en dessous de cette limite. De même, les tests pour le Finwing Penguin et le X-UAV Talon n'ont pas été réalisés au-dessous de  $-15^{\circ}\text{C}$ , car il avait déjà été démontré qu'ils étaient opérationnels jusqu'à  $-40^{\circ}\text{C}$  et avec des limitations à  $-50^{\circ}\text{C}$ .

Le BlitzRCWorks Skysurfer Pro ne peut être utilisé qu'à des températures supérieures à zéro, car le variateur de vitesse électronique cesse de fonctionner en dessous de  $0^{\circ}\text{C}$ . Le variateur de vitesse électronique contrôle directement le moteur et est donc essentiel pour le vol automatisé. Il est toujours possible de réaliser des vols manuels pendant les campagnes sur le terrain. Ces vols ont été effectués entre  $-20^{\circ}\text{C}$  et  $-30^{\circ}\text{C}$ . Le Finwing Penguin et le X-UAV Talon ont démontré qu'ils étaient pleinement opérationnels jusqu'à  $-40^{\circ}\text{C}$ , mais qu'à  $50^{\circ}\text{C}$ , les servomoteurs qui contrôlent le tangage, le lacet et le roulis ont une portée de mouvement réduite. Selon ces résultats, les deux aéronefs peuvent être pilotés à des températures avoisinant les  $-40^{\circ}\text{C}$ . Ce test a également montré que les autres composants comme le GPS, le module de télémétrie, le récepteur radio et le pilote automatique (dans ce cas-ci Pixhawk 2) sont fonctionnels dans les températures testées.

## Capteurs montés

À ce jour, deux types de caméras uniquement ont été utilisés dans la conception du système de UAS à

construire soi-même. Le principal système de caméra utilisé pendant le travail sur le terrain est un GoPro 6. En plus de sa conception robuste et étanche, la GoPro 6 peut être utilisée à des températures avoisinant -30 °C pendant deux vols et toute la préparation (environ 1 heure). L'autre caméra utilisée est la caméra usuelle installée sur le Phantom 3 Professional de DJI. Cette caméra a été utilisée lors des missions d'été et a donné des résultats fiables, qui sont présentés dans le chapitre suivant. Une petite caméra (MAPIR Survey 3, environ 50 g, 59 x 41,5 x 36 mm) et un petit système de radar à ondes continues modulées en fréquence en bande Ka (environ 700 g, 200 x 130 x 150 mm) seront montés sur le UAS de conception fait soi-même en 2019-2020. Le système radar a déjà été utilisé lors de travaux sur le terrain à des températures avoisinant -40 °C et n'a montré aucun signe de limitation liée au froid. Il sera

utilisé pour le prélèvement d'épaisseur de neige et de glace à l'aide de UAS (Pomerleau et al., 2018).

### Sommaire et aperçu

La possibilité d'adapter des UAS spécifiques à tous les besoins, de modifier les cadres et de réutiliser les composants électronique rend l'approche fait soi-même intéressante pour les groupes de recherche de taille moyenne qui peuvent se permettre la main-d'œuvre nécessaire pour construire ce type de système. L'approche fait soi-même permet également une grande indépendance sur le terrain s'il est nécessaire d'effectuer des réparations et des dépannages, ce qui est un avantage. Avec l'émergence des nouvelles technologies, les cadres deviendront obsolètes ou seront améliorés. Pouvoir s'adapter à ces changements à faible coût pour chaque système de UAS est l'un des

Tableau 4 : Résultats des tests sur les composants électroniques dans des conditions de froid extrême. Le « X » signifie que le dispositif électronique a échoué au test, le crochet que le test a réussi et le crochet entre parenthèses que le dispositif électronique a continué à fonctionner, mais à une capacité réduite.

Modèle	Temp. (°C)	ESC/armement	Servo	Commentaire
BlitzRCWorks Sky Surfer Pro	0	✓	✓	
	-5	X	✓	
	-10	X	✓	
	-15	X	✓	
	-20	X	✓	
	-30	X	✓	
	-40	Na	Na	Les tests n'ont pas été poursuivis
-50	Na	Na		
Finwing Penguin	-10	Na	Na	Tests non réalisés
	-15	Na	Na	
	-20	✓	✓	
	-30	✓	✓	
	-40	✓	✓	
	-50	✓	(✓)	Les servos ne se déplacent pas dans toute la gamme
X-UAV Talon	-10	Na	Na	Tests non réalisés
	-15	Na	Na	
	-20	✓	✓	
	-30	✓	✓	
	-40	✓	✓	
	-50	✓	(✓)	Les servos ne sont pas à la hauteur

plus grands avantages de l'approche fait soi-même. Pour plus d'informations sur notre construction et nos composants électroniques, voir l'annexe E.

### Activités générales

- Une imprimante 3D est utilisée pour personnaliser davantage les charges utiles et les aspects généraux de l'aménagement « intérieur » du système de UAS fait soi-même. Plusieurs pièces peuvent être commandées en ligne ou être conçues rapidement. L'acide polyactique s'est révélé être un matériau adéquat dans la plupart des circonstances, mais un matériau écologique, l'acrylonitrile butadiène styrène (ABS), a été utilisé dans la plupart des cas. Les pièces en plastique imprimées en 3D étaient moins fragiles que prévu.
- Il faut au moins 30 minutes pour atteindre les sites de recherche en motoneige. Ces voyages sont durs pour tout matériel. Comme les expériences de chauffage de l'aéronef n'ont pas bien fonctionné, la meilleure pratique actuelle consiste à laisser le cadre refroidir et à simplement le protéger en vue du trajet difficile. Puisque certaines colles (par exemple, le dessous des bandes Velcro) perdent de leur adhérence dans le froid, il est préférable d'utiliser un montage mécanique lorsque cela est possible.
- Les expériences ont également démontré qu'il est important de garder les batteries chaudes jusqu'au dernier moment. Au départ, des batteries de 4 000 mAh ont été utilisées. Après avoir réalisé la série de tests, des batteries de 5 200 mAh ont été principalement utilisées. Ce changement accroît le poids et diminue la capacité de charge utile pour les capteurs, mais le temps de vol supplémentaire qui en résulte compense cela.
- Bien que des atterrissages difficiles puissent se produire, les rayures de surface peuvent être facilement réparées avec du ruban adhésif Tuck, de la super-colle et de l'époxy.

### Travaux et projets futurs

Au début du développement du UAS, il était nécessaire de prendre le contrôle manuel de l'aéronef à plusieurs reprises (panne du variateur de vitesse électronique, réglages du pilote automatique, etc.). Ces problèmes ont été résolus lors des campagnes du printemps et de l'été 2019 et le pilote automatique fonctionne

désormais très bien. Pour les missions de vol dans des conditions d'hiver polaire, des UAS à voilure fixe seront utilisés pour la plupart du temps, sauf en cas de besoins particuliers (par exemple, vol stationnaire et vols à basse altitude pour les mesures radar). Le projet de construction d'un quadricoptère à la fin de 2019 permettra de réaliser des vols avec le nouveau système radar FMCW. Un autre projet futur consistera à accroître la flexibilité de la charge utile.

Des travaux sont également en cours pour mettre au point un système de montage qui supportera à la fois les systèmes artisanaux et les systèmes en vente sur le marché avec un petit adaptateur propre au UAS. Le fait de pouvoir monter des charges utiles indépendantes sur n'importe quel système permettra aux scientifiques de mener des recherches plus efficacement. En 2019, plusieurs UAS de série à prix raisonnable (par exemple, le Phantom 4 RTK et le Matrice 600 Pro de DJI, qui coûtent tous deux moins de 10 000 \$ US) ont été mis en marché. Le grand avantage des nouveaux UAS disponibles sur le marché est qu'ils sont prêts à l'emploi, ce qui permet aux utilisateurs inexpérimentés d'obtenir des résultats acceptables en très peu de temps. Cependant, les utilisateurs inexpérimentés ont généralement une compréhension moindre du fonctionnement du UAS et peu d'expérience en vol manuel, ce qui est préoccupant, puisque les missions se déroulent dans un environnement difficile, qui ajoute beaucoup de stress en raison de ses conditions naturelles.

### Utilisations du UAS : Prélèvement de la profondeur de la neige

Cette rubrique démontre les capacités de la conception du système de UAS fait soi-même de ce projet pour prélever l'épaisseur de la neige dans l'Arctique. La technique utilisée pour prélever l'épaisseur de neige par des UAS est basée sur la méthode de structure en mouvement décrite ci-après. Cette technique est largement utilisée par les scientifiques et les arpenteurs (Fernandes et al., 2018). À partir de ce flux de travail, des cartes topographiques précises sont obtenues et peuvent être utilisées à de nombreuses fins, notamment pour constater l'évolution temporelle des glissements de terrain (Turner et al., 2015) et pour la reconstruction d'un bâtiment historique (Murtiyoso et al., 2017).

Tableau 5 : Description des MNS pour les vols d'été et d'hiver. Les deux vols ont été effectués en mode manuel.

DSM	UAS	Vol		
Neige (hiver)	BlitzRCWorks Sky Surfer Pro Voilure fixe	Mode : Manuel Zone : 40 000 m <sup>2</sup>	Nb images Resolution (DSM) Altitude	548 6 cm 20-50 m
Vol	1	Date 2018-04-23	Superficie (m <sup>2</sup> ) 20 000	
	2	2018-04-26	20 000	
Déneigement (été)	DJI Phantom 3 Professional Multi rotor	Mode : Manuel Zone : 40 000 m <sup>2</sup>	Nb images Résolution (DSM) Altitude	709 4 cm 50 m
Vol	1	Date 2018-07-11	Superficie (m <sup>2</sup> ) 10 000	
	2	2018-07-17	10 000	
	3	2018-07-25	20 000	

## Introduction

Les différentes profondeurs de la neige sont dérivées de la différence entre deux cartes topographiques. La façon la plus précise de calculer l'épaisseur de la neige est d'utiliser un modèle numérique de surface (MNS), où un modèle de surface est acquis en été (neige-état zéro) et un autre en hiver (neige-état en cours). Cette technique a été utilisée pour la cartographie de l'épaisseur de la neige dans les régions alpines (par exemple, par Bühler et al., 2016 ; De Michele et al., 2016 ; et Eckerstorfer et al., 2015). Il n'existe toutefois que très peu d'études pour les régions Arctiques :

- Nolan et al., (2015) ont cartographié l'épaisseur de la neige en Alaska avec un aéronef, en utilisant une structure en mouvement dotée d'un appareil photo grand public. Ils sont parvenus à obtenir une précision de l'épaisseur de la neige Arctique de 10 cm lorsque les influences de la végétation et d'autres facteurs ont été minimisées.
- Cimoli et al., (2017) ont cartographié l'épaisseur de la neige au Svalbard et au Groenland à l'aide de UAS, mais ont utilisé un MNS terrestre pour recueillir des conditions de neige à l'état zéro en été. Ils ont mesuré une fourchette d'écart-type de 5 à 18 cm pour des sites multiples.

- Bühler et al., (2016) ont cartographié l'épaisseur de neige en terrain alpin avec des UAS. Leur étude démontre que les structures en mouvement fonctionnent pour calculer l'épaisseur de neige en terrain alpin avec une précision acceptable, avec un écart-type de 0,07 m à 0,15 m dans les prairies et un écart-type de moins de 0,3 m dans les zones avec des buissons ou des herbes hautes.

Le flux de travail de la structure en mouvement utilise plusieurs images pour créer une reconstruction en 3D. La première étape consiste à trouver les caractéristiques (ou points d'attache) qui apparaissent dans plusieurs images. Ces points sont trouvés en utilisant l'algorithme de détection SIFT (Scale Invariant Feature Transform) (Lowe, 2004). Une première reconstruction 3D peut être effectuée en utilisant les paramètres estimés de la caméra (position et orientation), ce qui donne un nuage de points 3D. Ce processus est optimisé par l'utilisation d'un ajustement par faisceaux (Granshaw, 1980).

## Utilisation des prélèvements d'épaisseur de la neige

Dans le cadre de ce projet, des points d'appui au sol avec des positions connues ont été utilisés pour affiner les paramètres de la caméra et fournir un référentiel GPS pour le nuage de points. Ce projet a utilisé la version 1.4.3 de Photoscan d'Agisoft et les points d'appui au sol ont été acquis en utilisant un système

GPS différentiel (dGPS) constitué d'un Trimble Net R9 avec une antenne géodésique Trimble Zephyr comme station de base, et d'un récepteur u-blox comme rover. Un point à la station de base a été mesuré à partir d'une acquisition statique de 5 heures, avec un intervalle d'échantillonnage d'une seconde. La position a ensuite été affinée à l'aide du Positionnement Ponctuel Précis (PPP) de Ressources naturelles Canada.

L'exactitude relative des cibles est de 0,5 cm sur les axes X et Y et de 1 cm sur l'axe Z. Il s'agit de la précision du logiciel dGPS utilisé (EZSurv version 3.98.374 de Effigis Geo Solution), mais la précision absolue du positionnement dépend du résultat PPP de la station de base (X, Y, Z) = (2, 3, 5 cm). L'erreur de positionnement absolu est importante lorsque deux ensembles de mesures sont comparés, par exemple pour différencier deux MNS, alors que le positionnement relatif fait référence à la précision au sein de chaque ensemble. Par exemple, la précision des points d'appui au sol précisés dans le logiciel Agisoft Photoscan lors du calcul du MNS est liée au positionnement. La précision absolue, en revanche, aurait un impact sur l'erreur globale de la carte d'épaisseur de la neige.

L'un des principaux problèmes est le lien avec la précision absolue de la station de base. La station de base n'était pas fixée sur le même point pendant les vols d'hiver et ceux d'été, ce qui entraînait plus d'incertitudes quant à son positionnement. Une tige a été enfoncée dans le sol afin de créer un point statique pour les futures campagnes sur le terrain. Le risque que la tige soit déchaussée en raison de la turbation périglaciaire reste faible dans cette région. Il sera important d'installer la station de base pour les vols d'hiver et d'été sur ce point afin de pouvoir éliminer l'erreur absolue de positionnement. Il a été nécessaire d'effectuer une correction en ajoutant 10 cm au MNS hivernal à partir d'une zone sans neige connue dont l'épaisseur de neige était négative. Cette zone sans neige était à peine couverte de neige, mais des rochers étaient clairement visibles. L'épaisseur moyenne de neige de cette petite zone était de -13 cm, c'est pourquoi une correction de 10 cm a été appliquée à l'ensemble de la carte d'épaisseur de la neige (c'est-à-dire le MNS d'hiver). Là encore, comme la station de base n'a pas été fixée sur le même point, ce décalage est du même ordre de grandeur si l'on ajoute l'incertitude des deux points ( $z = 5$  cm) au résultat du PPP. La zone sans neige peut améliorer l'inscription des deux MNS (Nolan et al., 2015).

Un MNS total a été interprété en fusionnant plusieurs zones de vol étudiées sur une période de 2 à 3 jours (voir tableau 5). La réalisation de mesures de validation à partir d'un prélèvement de neige prend du temps. Elles ont été effectuées immédiatement après chaque vol, ce qui limite le nombre de vols par jour. Les dates des différents vols figurent dans le tableau 5. Les différentes conditions de lumière ne sont pas optimales car elles induisent une erreur dans le processus de reconstruction 3D en raison du flux de travail de la structure en mouvement et doivent être prises en compte. Des mesures manuelles de la profondeur de la neige ont été effectuées pour valider le MNS à l'aide d'une sonde à avalanche, géolocalisée par l'antenne dGPS. Fait à noter, les GPS portables typiques des nouveaux appareils, comme la Magnaprobe (Sturm, 2018), n'ont pas une précision X, Y, Z suffisante puisque la taille des pixels MNS est d'environ 5 cm. Ces mesures ont été effectuées avec la sonde d'avalanche couplée au même système dGPS utilisés pour les points d'appui au sol. Cette méthode offre une excellente correspondance entre les points validation et la carte produite par UAS. Considérant la très grande variabilité spatiale de l'épaisseur de la neige et la résolution des pixels d'environ 4 à 6 cm prélevés par une structure en mouvement, une telle précision est essentielle.

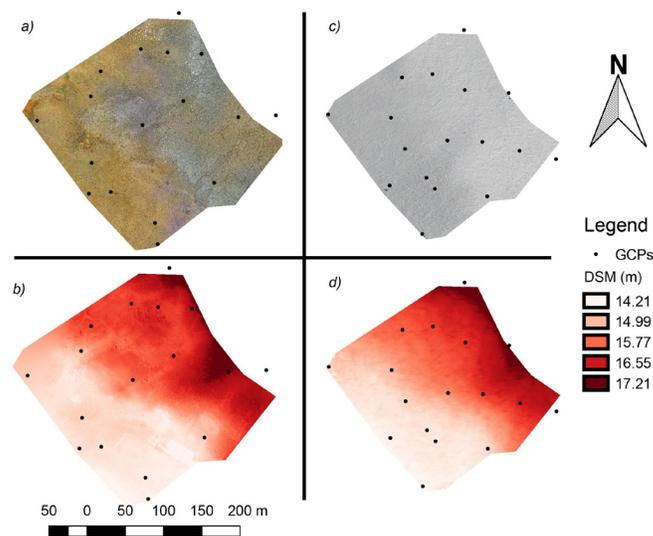


Figure 7 : Orthophotographie et images MNS du site d'étude près de Cambridge Bay (69°13'19,66" N, 104°53'54,91" O). La partie supérieure gauche (a) montre l'orthophotographie du vol d'été avec plus de végétation sur la gauche et plus de rochers sur la droite. La partie inférieure gauche (b) montre le MNS résultant du vol d'été. Sur le côté droit, (c) et (d) illustrent les résultats des orthophotographies et du MNS pour les vols d'hiver.

Au total, 155 points de validation (voir Figure 8) ont été pris et sont répartis sur la surface cartographiée de 40 000 m<sup>2</sup>. Pour plus de renseignements sur le site de l'étude, voir l'annexe B.

## Résultats et discussion

Le logiciel Agisoft Photoscan a été utilisé pour traiter toutes les images. La figure 7 montre à la fois le MNS et l'orthophotographie des conditions d'enneigement et de déenneigement. La résolution du MNS est de 4 cm pour le vol d'été et de 6 cm pour le vol d'hiver. Un total de 18 points d'appui au sol (voir la figure 7) ont été utilisés pour optimiser les paramètres et les positions des caméras. Aucun point d'appui au sol n'étant disponible pour une validation externe, il n'est pas possible de fournir une estimation externe de la précision du MNS. L'erreur par point d'appui au sol est de 8 cm en moyenne (voir l'annexe D) et est donc intrinsèque à l'optimisation car elle réduit la différence entre la position réelle du point d'appui au sol et la position du point d'appui au sol sur le nuage de points en optimisant les paramètres de la caméra (plus de détails sur les points d'appui au sol se trouvent aux annexes A et D). À l'avenir, le UAS de conception fait soi-même sera doté d'un système dGPS qui fournira une solution permanente (précision cinématique en temps réel) pour toutes les photos prises pendant le vol. Cela permettra d'utiliser la plupart des points d'appui au sol pour évaluer la précision du MNS et de laisser 3 à 4 points au sol pour l'optimisation (s'il y a lieu). Cette mesure est nécessaire pour maximiser la précision et la fiabilité du MNS et pour détecter les erreurs systématiques (James et al., 2017 ; Goetz et al., 2018).

Sur la figure 7 (a), on peut voir une zone de végétation à l'ouest et un terrain plus rocheux à l'est. La végétation est caractérisée par des arbustes et des cypéracées, plus précisément des *Salix richardsonii* et des *Carex aquatilis*. Cela a une incidence sur la précision de la carte de l'épaisseur de la neige, comme le montre la figure 8. L'incertitude provient du tassement de la neige sur la végétation, là où la surface estivale du MNS (c'est-à-dire la surface de la végétation) est plus faible sous la neige compactée. Cette conclusion correspond aux valeurs d'écart-type plus élevées enregistrées par Nolan et al. (2015) et Bühler et al. (2016) dans les zones végétalisées. En ce qui concerne le MNS hivernal, il y a une nette influence du vent soufflant sur la neige, ce qui entraîne des bancs de neige compacte (voir l'annexe C pour une orthophotographie en taille réelle).

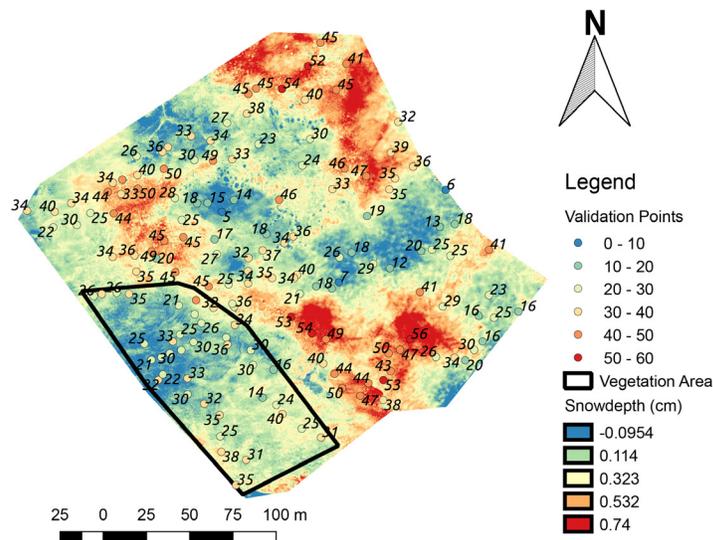


Figure 8 : Carte de l'épaisseur de la neige résultant de l'approche par structure en mouvement. La zone circonscrite en noir montre des résultats négatifs en raison de l'influence de la végétation.

Ces bancs de neige offrent beaucoup de contraste à l'image et permettent de détecter plus facilement des points sur plusieurs images, même si les images sont essentiellement blanches. Certains points d'appui au sol semblent être en dehors du MNS/orthophotographie (Figure 7). Il s'agit d'un effet artificiel, car seules les régions présentant un chevauchement suffisant entre les images sont utilisées pour créer le MNS. Le chevauchement entre les deux MNS est équivalent à la carte d'épaisseur de neige (voir figure 8). La figure 8 montre également qu'il existe 155 points de validation, avec une épaisseur moyenne de neige de 33 cm.

La figure 9 montre la comparaison entre l'épaisseur de neige des points de validation et de la carte dSM\_UAV. La ligne orange représente la meilleure correspondance entre les points de validation et la carte produite par UAS. Les points de validation sur la végétation sont indiqués en rouge et ont été supprimés du deuxième graphique de la figure 9. Les zones de végétation ont été ciblées à l'aide d'une combinaison de photographies provenant de la conception du UAS fait soi-même et d'observations au sol. On peut voir dans le tableau 6 que ces points de végétation ont une incidence sur la corrélation et l'écart-type. L'écart-type général est de 16 cm, ce qui est comparable à la littérature.

Comparativement aux travaux dans les régions alpines ou les environnements de toundra, le manteau neigeux de l'Arctique près de Cambridge Bay est plutôt faible,

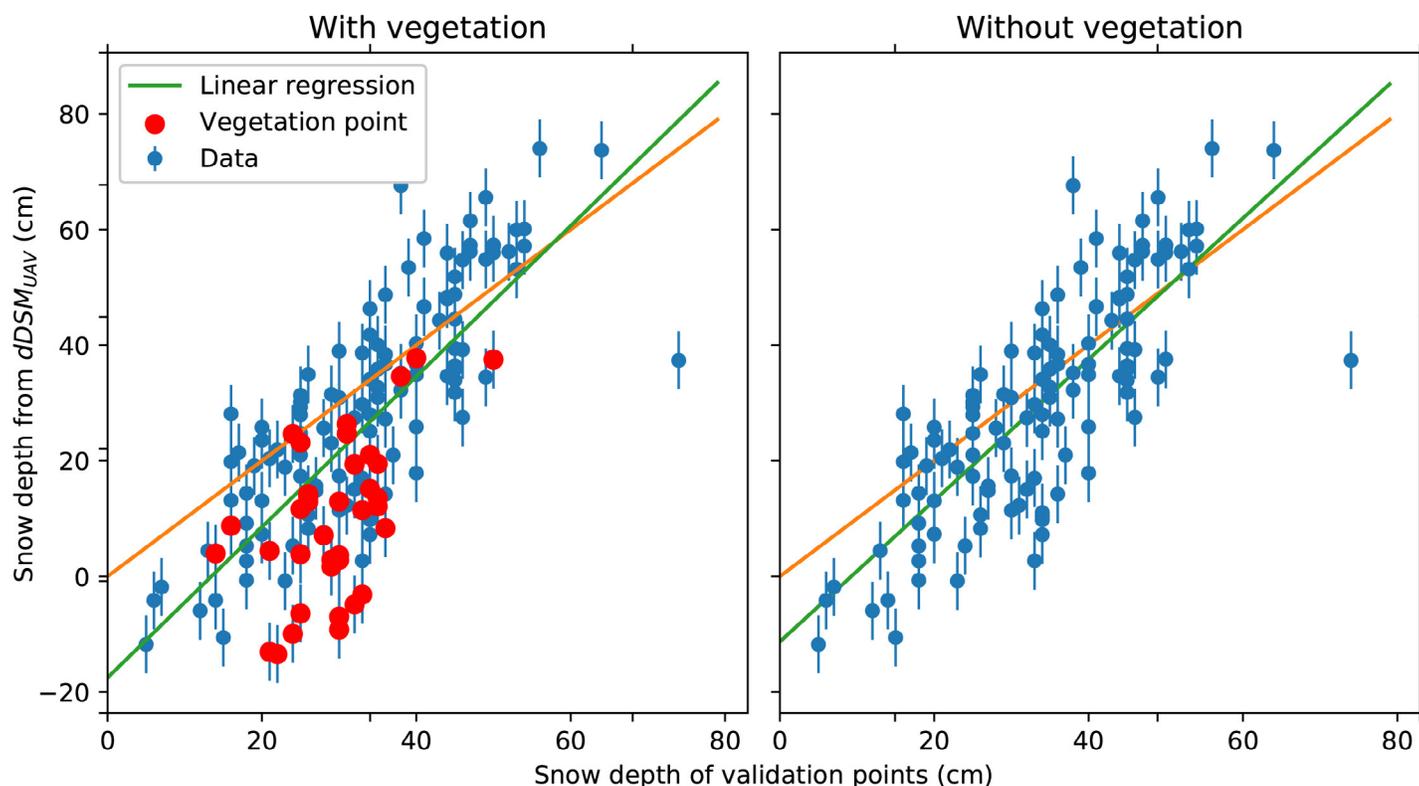


Figure 9 : Régression entre les points de validation de l'épaisseur de la neige et les points d'épaisseur de la neige dérivés du UAS.

avec une moyenne de 33 cm, mesurée au début du printemps (avril 2018). Par conséquent, la micro-topographie et la végétation ont une plus grande influence sur la précision de la carte. La manipulation et le traitement du système mondial de navigation par satellite (GNSS) pourraient être améliorés (comme expliqué précédemment) par la correction de 10 cm de décalage appliquée au MNS d'hiver. D'autres améliorations seront également possibles en passant des vols manuels aux vols automatisés, car une altitude constante et un chevauchement constant augmenteront l'uniformité du nuage de points. De plus, le réglage

Tableau 6 : Paramètres de régression linéaire et écart-type à partir des points de validation de l'épaisseur de la neige.

	Avec végétation	Sans végétation
a	1.30	1.22
b	-18	-11
No. de points	155	118
RMSE	16 cm	13 cm
R2	0.57	0.64
valeur-p	2.14 e-30	1.66 e-27

de la caméra sur des paramètres fixes et des zones de vol le même jour permettra d'obtenir des conditions de lumière constantes et réduira les incertitudes de reconstruction du nuage de points (Bühler et al., 2017). Une caméra à plus haute résolution sera également testée pour obtenir de meilleurs résultats MNS (voir l'annexe A pour plus de renseignements sur la caméra).

## Conclusions

Ce projet visait à construire un aéronef capable de voler dans les conditions hivernales du Nord, c'est pourquoi l'accent a été mis sur les tests de matériaux dans un contexte de températures froides. Les batteries et les composants électroniques ont été testés à différentes températures afin de comprendre leurs limites avant de les utiliser sur le terrain. Au départ, il n'y avait pas de préférence de batterie. Dans le cadre de ces expériences, des batteries de tailles et de formes différentes ont été achetées pour ce projet et pour d'autres utilisations, comme l'alimentation du système radar. Le fait de pouvoir disposer d'une variété de batteries est utile et permet de choisir la batterie en fonction des exigences de la mission. Les UAS à voilure fixe de conception fait soi-même sont proches de leur

charge utile maximale, c'est pourquoi des batteries un peu plus petites sont préférées pour ces missions. En revanche, le quadricoptère, qui doit encore être construit, bénéficiera d'une plus grande capacité de charge, de sorte que la taille de la batterie aura moins d'importance.

Actuellement, un aéronef supplémentaire de type Finwing Penguin a été acheté. Il est doté d'un moteur plus puissant que le BlitzRCWorks Skysurfer Pro et est plus facile à faire voler dans le vent, à préparer et à entretenir sur le terrain. Les prochaines étapes consisteront à concevoir et à construire un quadricoptère pour le système radar. Actuellement, un système capable de voler relativement bas et lentement est nécessaire. Un planeur peut assurer ce dernier, mais les vols à basse altitude (moins de 5 m) sont trop risqués. De plus, la capacité de vol stationnaire permettra de viser plus facilement les mesures du nadir. De petites déviations se produiront et l'équipe de recherche devra décider s'il faut les contrer avec un gyroscope ou un accéléromètre électronique. Le second a l'avantage d'être plus léger, le premier d'atteindre réellement le nadir. En outre, le fait de travailler plus fréquemment sur la plateforme X-UAV Talon permettra à l'avenir des vols à des vitesses de vent plus élevées.

En termes d'applications scientifiques, la prochaine étape intuitive consiste à ajouter l'indice de végétation par différence normalisée (IVDN) à la carte d'épaisseur de neige. Cela permettra d'établir une relation empirique entre le biais de l'épaisseur de la neige et le type de végétation et pourrait également conduire à une analyse plus précise de l'interaction entre la neige et les arbustes (Sturm et al., 2001). Une analyse de la micro-topographie est également prévue. Elle utilisera un indice topographique, comme un indice de pente au vent, associé au vent dominant pour mieux comprendre les processus de redistribution de la neige (Winstral et al., 2002). Cette analyse peut être utile pour les travaux thermiques du sol. Ce type de carte est assez rare dans l'Arctique compte tenu de toutes les contraintes logistiques mises en évidence dans ce travail. Malgré la rareté des données disponibles à ce jour, les futures informations sur l'épaisseur de la neige à haute résolution seront utiles pour l'hydrologie (moment de la fonte, processus géochimiques), le pergélisol (surveillance de la couche active) et l'écologie (caractérisation de l'habitat). De nombreux processus physiques à ce niveau influencent les processus à plus grande échelle, et des cartes détaillées de distribution

de la neige pourraient être utilisées pour analyser la variabilité inférieure au pixel des modèles de neige ou les prélèvements d'état de surface (c'est-à-dire l'équivalent en eau de la neige) dérivés d'images satellites à résolution grossière.

## Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier David Rancourt et Alexis Lussier-Desbiens pour leur formation et leur soutien dans la construction et la modification de nos cadres. Leurs connaissances et leur expérience dans la conception de UAS ont contribué de manière significative au succès de nos vols. Ce projet a été financé par Savoir polaire Canada, le Conseil national de recherches en sciences et en génie du Canada (CRSNG) et le Fonds Québécois de la recherche sur la nature et les technologies (FRQ-NT). Nous remercions tout particulièrement le personnel de la Station canadienne de recherche dans l'Extrême-Arctique (SCREA) et la communauté de Cambridge Bay, au Nunavut, pour leur formidable soutien logistique pendant les campagnes sur le terrain.

## Annexe A

Description des deux caméras utilisées pour la création de la carte de l'épaisseur de la neige. La GoPro 6 a dû être utilisée en mode linéaire pour éviter la distorsion en œil de poisson de ce type de caméras d'action qui réduit la résolution. Des vidéos ont également été enregistrées et testées (au lieu de photographies) pendant le vol, ce qui a entraîné une perte de résolution spatiale et un post-traitement beaucoup plus lourd.

## Annexe B

Voici une carte qui montre le site d'étude à Cambridge Bay, Nunavut, Canada. Le site d'étude est plus précisément situé dans le bassin versant du lac Greiner.

## Annexe C

Vue d'ensemble des orthophotographies pour les vols d'avril où on peut observer les configurations spatiales de la neige causées par le vent. La zone en noir est la zone sans neige utilisée pour appliquer la correction de 10 cm expliquée dans la rubrique sur l'utilisation du prélèvement de la profondeur de la neige.

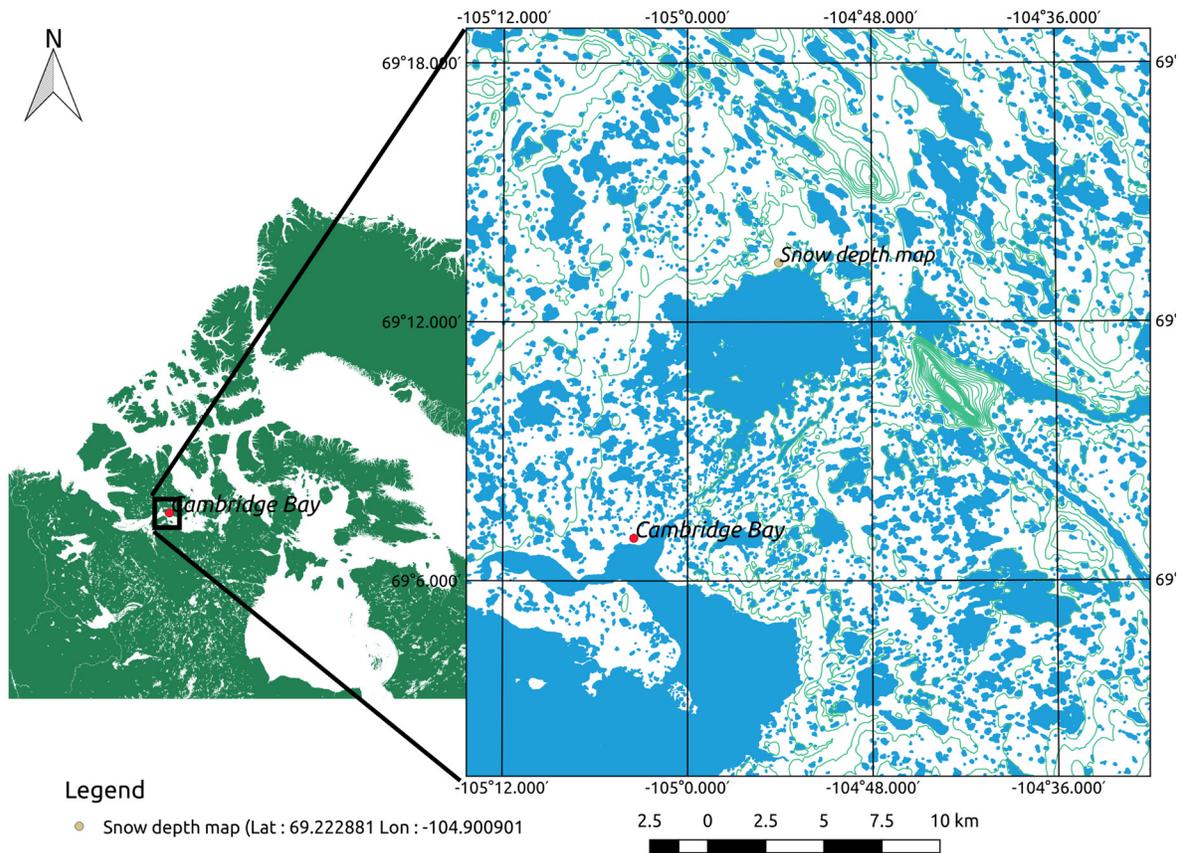


Figure 10 : Carte du site d'étude du bassin versant du lac Greiner.

## Annexe D

Points d'appui au sol avec leur précision de localisation par rapport au système GPS et la différence (erreur (m)) entre la position et le modèle 3D. Seuls les points d'appui au sol d'été sont présentés, car la précision en hiver et en été est semblable.

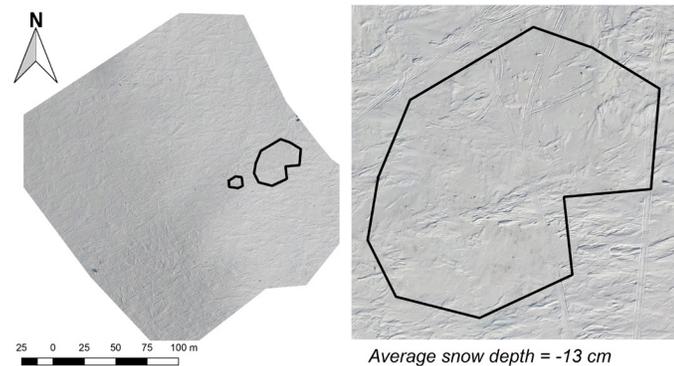


Figure 11 : Ortophotographies des vols d'avril.

## Annexe E

Les composants de la conception du système de UAS fait soi-même peuvent être séparés en deux catégories différentes :

1. La mécanique, le cadre étant le UAS lui-même (dans ce cas, un cadre à ailes fixes); et
2. L'électronique, soit tous les composants électroniques internes (reliés à l'autopilote).

L'un des avantages de l'approche fait soi-même est la possibilité de réutiliser ou d'utiliser à d'autres fins l'électronique pour différents UAS (y compris ceux à voilure fixe et tournante).

Markers	Easting (m)	Northing (m)	Altitude (m)	Accuracy (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
✓ 101	503990.002000	7679155.692000	14.802000	<b>0.005/0.012</b>	0.028189	11	0.365
✓ 102	503924.449000	7679084.147000	14.112000	<b>0.005/0.012</b>	0.048929	12	0.767
✓ 103	503921.187000	7679108.808000	14.281000	<b>0.005/0.012</b>	0.058068	14	0.515
✓ 104	503869.852000	7679144.885000	14.388000	<b>0.005/0.012</b>	0.225831	10	0.589
✓ 105	503844.497000	7679142.810000	14.362000	<b>0.005/0.012</b>	0.111675	13	0.335
✓ 106	503906.737000	7679222.762000	15.545000	<b>0.005/0.012</b>	0.055086	4	0.135
✓ 201	503844.516000	7679142.837000	14.365000	<b>0.006/0.016</b>	0.118750	12	0.257
✓ 202	503906.727000	7679222.769000	15.551000	<b>0.005/0.006/0....</b>	0.050462	16	0.255
✓ 203	503847.647000	7679178.554000	14.611000	<b>0.006/0.007/0....</b>	0.029599	11	0.399
✓ 204	503784.159000	7679227.752000	14.868000	<b>0.006/0.007/0....</b>	0.106292	13	0.387
✓ 205	503846.518000	7679256.293000	15.020000	<b>0.006/0.007/0....</b>	0.148801	13	0.166
✓ 206	503857.960000	7679285.157000	15.722000	<b>0.006/0.007/0....</b>	0.083373	11	0.321
✓ 307	503904.894000	7679311.262000	16.051000	<b>0.006/0.007/0....</b>	0.065924	11	0.424
✓ 308	503949.014000	7679352.993000	17.370000	<b>0.005/0.006/0....</b>	0.027096	10	0.326
✓ 309	503935.949000	7679307.399000	16.135000	<b>0.005/0.006/0....</b>	0.080173	14	0.435
✓ 310	503975.339000	7679305.502000	16.586000	<b>0.005/0.006/0....</b>	0.056571	18	0.146
✓ 403	503954.077000	7679250.819000	15.961000	<b>0.005/0.012</b>	0.034524	11	0.311
✓ 404	504018.222000	7679231.977000	16.939000	<b>0.005/0.013</b>	0.024358	27	0.179
✓ 405	503975.348000	7679305.466000	16.591000	<b>0.005/0.012</b>	0.063655	30	0.198
✓ 406	504061.918000	7679233.983000	16.859000	<b>0.005/0.013</b>	0.069560	13	0.240
<b>Total Error</b>							
Control points					0.088421		0.353
Check points							

Figure 12 : Renseignements détaillés sur les points d'appui au sol dérivés du MNS d'été.

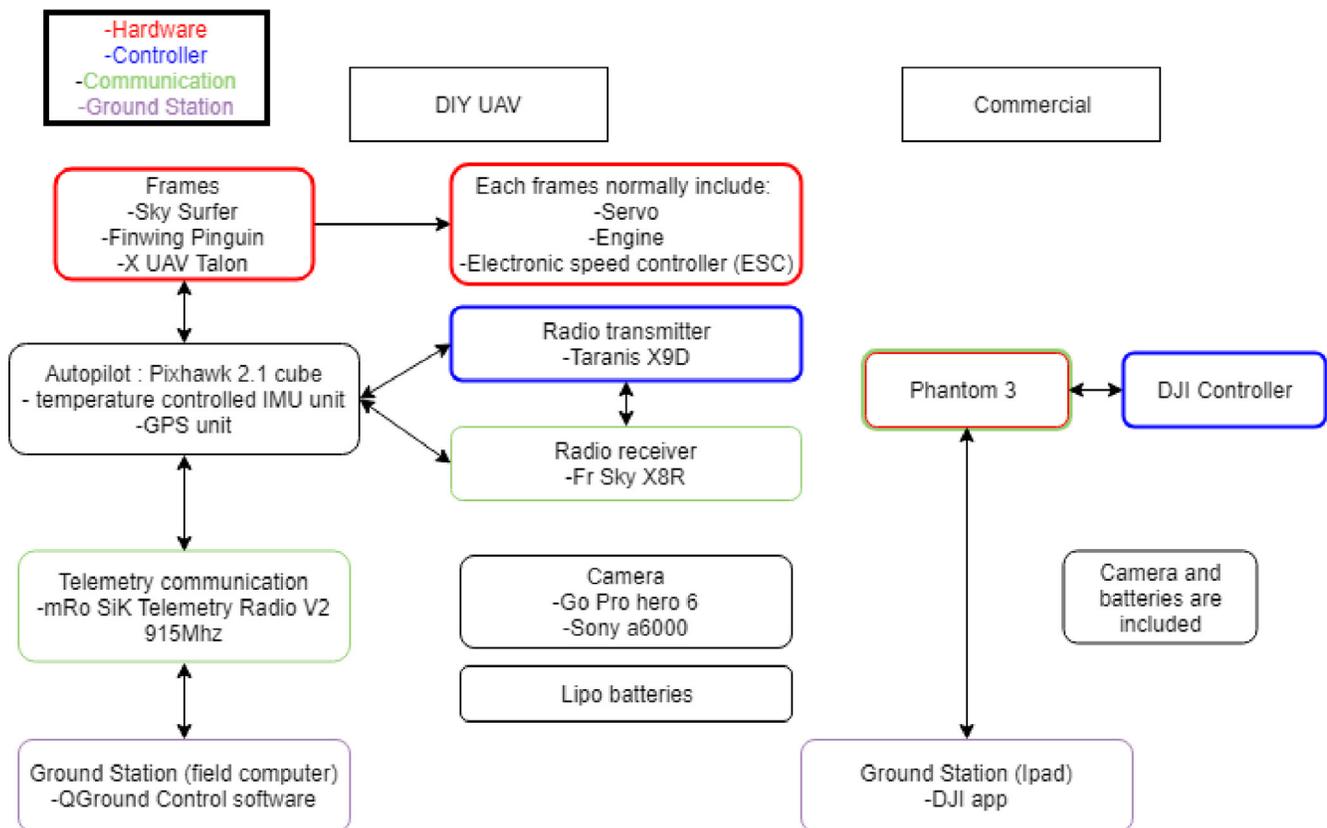


Figure 13 : Composants de la conception d'un système fait soi-même (à gauche) par rapport aux composants commerciaux (à droite).

## Références

- Abdilla, A., Richards, A., Burrow, S. 2015. Power and Endurance Modelling of Battery-Powered Rotorcraft. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS).
- Ader, M., Axelsson, D. 2017. Drones in Arctic Environments. Master thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- Anderson, K., Westoby, M.J., James, M.R. 2019. Low-budget topographic surveying comes of age: Structure from motion photogrammetry in geography and the geosciences. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 43(2):163–173. Retrieved from: <https://doi.org/10.1177/0309133319837454>.
- Bühler, Y., Adams, M.S., Bosch, R., Stoffel, A. 2016. Mapping snow depth in alpine terrain with unmanned aerial systems (UAS): Potential and limitations. *The Cryosphere*, 10(3):1075–1088.
- Bühler, Y., Adams, M.S., Stoffel, A. Boesch, R. 2017. Photogrammetric reconstruction of homogenous snow surfaces in alpine terrain applying near-infrared UAS imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8-10):1–24.
- Chudley, T.R., Christoffersen, P., Doyle, S.H., Abellan, A., Snooke, N. 2019. High-accuracy UAV photogrammetry of ice sheet dynamics with no ground control. *The Cryosphere*, 13(3):955–968. Retrieved from: <https://doi.org/10.5194/tc-13-955-2019>.
- Cimoli, E., Marcer, M. Vandecrux, B., Bøggild, C.E., Williams, G., Simonsen, S.B. 2017. Application of Low-Cost Uass and Digital Photogrammetry for High-Resolution Snow Depth Mapping in the Arctic. *Remote Sensing*, 9(11):1–29. Retrieved from: <https://doi.org/10.3390/rs9111144>.
- De Michele, C., Avanzi, F., Passoni, D., Barzaghi, R., Pinto, L., Dosso, P., Ghezzi, A., Gianatti, R., Della Vedova, G. 2016. Using a fixed-wing UAS to map snow depth distribution: An evaluation at peak accumulation. *The Cryosphere*, 10:511–522.
- DJI. 2015. Phantom 3 Professional, User manual.
- Eckerstorfer, M., Solbø, S., Malnes, E. 2015. Using “Structure-from-Motion” Photogrammetry in Mapping Snow Avalanche Debris. *Wiener Schriften zur Geographie und Kartographie*, 21:171–178.
- Fernandes, R., Prevost, C., Canisius, F., Leblanc, S.G., Maloley, M., Oakes, S., Holman, K., Knudby, A. 2018. Monitoring snow depth change across a range of landscapes with ephemeral snowpacks using structure from motion applied to lightweight unmanned aerial vehicle videos. *The Cryosphere*, 12(11):3535–3550.
- Goetz, J., Brenning, A., Marcer, M., Bodin, X. 2018. Modeling the precision of structure-from-motion multi-view stereo digital elevation models from repeated close-range aerial surveys. *Remote Sensing of Environment*, 210:208–216.
- Granshaw, S.I. 1980. Bundle adjustment methods in engineering photogrammetry. *The Photogrammetric Record*, 10:181–207.
- James, M.R., Robson, S., d’Oleire-Oltmanns, S., Niethammer, U. 2017. Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion: Ground control quality, quantity and bundle adjustment. *Geomorphology*, 280:51–66.
- Jo, D., Kwon, Y. 2019. Development of Autonomous VTOL UAV for Wide Area Surveillance. *World Journal of Engineering and Technology*, 7(1):227–239. Retrieved from: <https://doi.org/10.4236/wjet.2019.71015>.
- Langlois, A., Royer, A., Goïta, K. 2010. Analysis of simulated and space-borne passive microwave brightness temperatures using in situ measurements of snow and vegetation properties. *Can. J. Remote Sensing*, 36(1):S135–S148.
- Lowe, D.G. 2004. Distinctive image features from scale invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 60(2):91–110.
- Mulgaonkar, Y., Whitzer, M., Morgan, B., Kroninger, C.M., Harrington, A.M., Kumar, V. 2014. Power and weight considerations in small, agile quadrotors. *SPIE Defense+ Security*, pp. 90831Q–90831Q, International Society For Optics and Photonics.

- Murtiyoso, A., Koehl, M., Grussenmeyer, P., Freville, T. 2017. Acquisition and processing protocols for UAV images: 3D modeling of historical buildings using photogrammetry. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 4:163–170.
- Nolan, M., Larsen, C., Sturm, M. 2015. Mapping snow depth from manned aircraft on landscape scales at centimeter resolution using structure-from-motion photogrammetry. *The Cryosphere*, 9:1445–1463.
- Pomerleau P. 2016. Conception d'un dispositif de caractérisation de la glace et de la neige à partir d'un radar à émission continue. Masters thesis, Université de Sherbrooke.
- Rutter, N., Sandells, M., Derksen, C., Toose, P., Royer, A., Montpetit, B., Langlois, A., Lemmetyinen, J., Pulliainen J. 2014. Snow stratigraphic heterogeneity within ground-based passive microwave radiometer footprints: Implications for emission modeling. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 119(3):550–565. doi:10.1002/2013JF003017.
- Salerno, D., Korsunsky R. 1998. Practical considerations in the design of lithium-ion battery protection systems. APEC '98 Thirteenth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition, IEEE. doi: 10.1109/APEC.1998.653975.
- Sturm, M. 2018. An Automatic Snow Depth Probe for Field Validation Campaigns. Technical Reports, 9695–9701.
- Sturm, M., McFadden, J.P., Liston, G.E., Chapin III, F.S., Racine, C.H., Holmgren, J., Stuart Chapin, F., Racine, C.H., Holmgren, J. 2001. Snow-Shrub Interactions in Arctic Tundra: A Hypothesis with Climatic Implications. *Journal of Climate*, 14(3):336–344.
- Turner, D., Lucieer, A., de Jong, S.M. 2015. Time series analysis of landslide dynamics using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV). *Remote Sensing*, 7(2):1736–1757.
- Wang, Q. 2015. Analysing and evaluating a thermal management solution via heat pipes for lithium-ion batteries in electrical vehicles. PhD thesis, University of Nottingham.
- Winslow, J., Benedict, M., Hrishikeshavan, V., Chopra, I. 2016. Design, development, and flight testing of a high endurance micro quadrotor helicopter. *International Journal of Micro Air Vehicles*, 8(3):155–169. doi: 10.1177/1756829316653694.
- Winstral, A., Elder, K., Davis, R.E. 2002. Spatial Snow Modeling of Wind-Redistributed Snow Using Terrain-Based Parameters. *Journal of Hydrometeorology*, 3:524–538.

# ACCROÎTRE LA SÉCURITÉ ET L'EFFICACITÉ DE L'UTILISATION DE LA GLACE DE MER PAR LA COMMUNAUTÉ DANS LA RÉGION DE KITIKMEOT À L'AIDE DU DÉVELOPPEMENT ET DU PARTAGE D'IMAGES DE TÉLÉDÉTECTION.



R.K. Scharien<sup>1\*</sup>, R.A. Segal<sup>1</sup>, C.-L. Tam<sup>2</sup>, et A. Wynden<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Département de géographie, Université de Victoria, Victoria, Colombie-Britannique, Canada

<sup>2</sup> Département de géographie, Université de Calgary, Calgary, Alberta, Canada

\* [randy@uvic.ca](mailto:randy@uvic.ca)

## Résumé

Les communautés nordiques ont un intérêt pour l'utilisation des technologies modernes leur offrant des renseignements sur les conditions météorologiques et les conditions de la glace de mer afin de les aider dans la planification et la réalisation d'activités fondées sur la glace de mer. Dans le cadre de notre projet financé par Savoir polaire Canada (POLAIRE), des collaborateurs de Kugluktuk et de Cambridge Bay ont participé aux travaux de recherche sur le terrain pendant trois saisons (printemps et automne 2017 et printemps 2018) afin de définir les caractéristiques importantes de la glace de mer pour la sécurité et la traficabilité. Les renseignements obtenus des réponses aux entrevues et des activités guidées sur la glace de mer ont été fusionnés aux données de télédétection par satellite disponibles. Des produits d'images améliorées ont été créés pour guider les futures activités sur la glace de mer de la communauté et ont été donnés aux communautés ayant collaboré au projet. La rugosité de la glace de mer est ressortie comme étant une des principales variables d'intérêt pour les résidents locaux se déplaçant essentiellement par motoneige sur la glace de mer. Des cartes prototypes de la rugosité de la glace de mer ont été développées à l'aide de données d'un radar à synthèse d'ouverture (SAR) du satellite Sentinel-1 et ont été transmises par voie électronique ou sous format papier. La rétroaction des communautés a ensuite été

utilisée pour améliorer l'utilité des cartes. Les cartes de rugosité étaient soit échelonnées en niveaux de gris, ou générées en trois couleurs correspondant à la terminologie Inuinaqtun locale pour la glace de mer — glace lisse : manniqtuk hiku ; glace modérément rugueuse : manitutun hiku ; et glace rugueuse : manipiatuk hiku. En général, les produits d'image améliorés ont eu une incidence immédiate ; les résidents les ont trouvés très exacts, utiles pour sauver du temps et du gaz lorsqu'ils étaient utilisés pour la planification et efficaces pour améliorer la sécurité. Les travaux en cours comprennent la validation de la rugosité de la glace de mer à l'aide de données aéroportées, la création d'un format pour la transmission en ligne et le partage des nouveaux produits avec les partenaires intéressés.

## Introduction

La portée du retrait de la glace d'été accroît la possibilité que les passages libres de glace s'étalent sur une plus longue période et que l'activité marine augmente. Toutefois, la variabilité annuelle des conditions régionales de la glace, la gravité des dangers engendrés par la glace et la capacité à les gérer commencent tout juste à être explorées. Des incertitudes relatives à la sécurité humaine et à la traficabilité de l'utilisation de la glace de mer,

### Références suggérées :

Scharien, R.K., Segal, R.A., Tam, C.-L., et Wynden, A. 2019. Accroître la sécurité et l'efficacité de l'utilisation de la glace de mer par la communauté dans la région de Kitikmeot à l'aide du développement et du partage de produits d'images de télédétection. *Savoir polaire* : Aqhaliat 2019, *Savoir polaire Canada*, p. 61–73. DOI: 10.35298/pkg.2019.06

combinée à des stratégies d'intervention d'urgence sous-développées, empêchent l'élaboration de pratiques et de politiques de gestion efficace pour les eaux sujettes aux glaces. Il est d'abord nécessaire d'augmenter la capacité d'observation et de prédiction des conditions de la glace de mer.

Les systèmes de radar à synthèse d'ouverture (SAR) génèrent une imagerie des conditions glaciaires à haute résolution spatiale (1 à 1 000 mètres), sans égard à la couverture nuageuse ou à la noirceur. Les SAR offrent un excellent potentiel d'information pertinente sur la glace de mer à l'échelle locale et régionale pour la sécurité et la traficabilité de la communauté (Druckemiller et al., 2009 ; Gauthier et al., 2010 ; Laidler et al., 2011). Très utilisés pour la cartographie des glaces, les SAR peuvent également distinguer les types de glace ou leurs étapes de formation et fournir des contrastes entre la glace, la terre et l'eau. Leur accessibilité restreinte, les méthodes complexes de traitement de l'image et les niveaux d'intensité de rétrodiffusion qui se chevauchent dissuadent généralement les utilisateurs d'employer les SAR directement. La mission Sentinel-1 de l'Agence spatiale européenne est composée de deux plateformes SAR identiques fonctionnant comme une constellation de satellites en orbite polaire, espacés de 180° l'un de l'autre en orbite (ESA, 2016). Sentinel-1 fait partie de *Copernicus*, le programme européen de l'observation de la Terre, conçu pour faire de la surveillance environnementale en intégrant les données transmises par satellite et par les capteurs de surfaces et systèmes pour veiller à la sécurité civile (Commission européenne, s.d.). Sentinel-1 revisite d'ailleurs fréquemment des emplacements en haute altitude comme l'Arctique canadien — aussi souvent qu'au < 1 jour, selon le format d'image. Cette grande fréquence de visite, jumelée au fait que les données de Sentinel-1 sont totalement gratuites et en libre accès, représentent un changement fondamental dans l'imagerie par SAR et ouvrent de nouvelles voies pour l'obtention d'information dans les domaines de la recherche et opérationnels.

Il est important de souligner que certains Inuit souhaitent employer des données scientifiques pour prévoir leurs activités de subsistance. Lorsqu'elles sont combinées au savoir traditionnel du comportement de la faune, les données sur la glace de mer et l'identification des dangers peuvent être utiles pour les personnes pratiquant la chasse, la trappe et la pêche dans les communautés de l'Arctique. Ces données peuvent également être utilisés

dans une gamme d'outils destinés aux jeunes afin d'ajouter au savoir traditionnel acquis des anciens par l'exposition aux connaissances scientifiques. Cette participation aux programmes jeunesse de la communauté peut nourrir la fierté culturelle, réduire les problèmes sociaux comme l'absentéisme, l'apathie, le vandalisme et le suicide et servir de modèle à de futurs citoyens et leaders.

Savoir polaire Canada (POLAIRE) a financé le projet « Télédétection multi-paliers de la glace de mer dans la mer de Kitikmeot : utilisation des nouvelles missions de constellations d'observation de la Terre pour la surveillance et la prévision des conditions des glaces de mer » dans le cadre de son programme de Sciences et technologies de POLAIRE 2017-2019. Ce projet rassemble :

- une expertise en télédétection radar, en géophysique de la glace de mer et en recherche sur le climat atmosphère-océan ;
- des champs de recherche ethnographique et participative auprès de population autochtone et de la communication sur les changements climatiques ; et
- l'assimilation et la prédiction des données relatives à la glace de mer.

L'objectif principal du projet est d'améliorer la capacité des chercheurs, des résidents du Nord et des partenaires gouvernementaux à surveiller et à prédire les conditions de la glace de mer. Ce projet vise également à préparer le lancement de la mission de la Constellation RADARSAT (MCR), la mission SAR phare du Canada, en 2019. Le présent article traite de la recherche liée aux objectifs du projet : *Travailler avec les communautés de Cambridge Bay et Kugluktuk pour définir les dangers associés à la glace de mer et les obstacles aux voyages et trouver de nouvelles façons de cartographier ces caractéristiques à l'aide de données de satellites*. Une étude portant sur les caractéristiques de la détectabilité et de la cartographie à l'aide des nouvelles données SAR colligées et de données de télédétection connexes a été menée. Cette étude a été alimentée par les connaissances autochtones et les renseignements de la communauté sur les routes associées à la glace de mer, les dangers et obstacles des voyages et les perspectives à propos des récents changements. Un des résultats de ces travaux, soit des renseignements améliorés sur la glace de mer, a été transmis aux communautés étudiées, dans des formats traditionnels et modernes.

## Recherche communautaire

La stratégie de recherche choisie se fonde sur le besoin de créer un projet de recherche dirigé localement, donnant lieu à un résultat final applicable, au moyen d'implications formelles et informelles auprès des membres de la communauté (Ford et al., 2018). Trois visites de terrain ont eu lieu à Cambridge Bay et Kugluktuk : au printemps 2017, à l'automne 2017 et au printemps 2018. En plus de ces visites, les relations ont été maintenues à distance par téléphone, courriels et médias sociaux. Le processus de recherche communautaire s'est déroulé en trois étapes. Au cours de la première étape, des relations ont été créées par la participation à des rassemblements sociaux, en nous présentant à la communauté locale et en démontrant un intérêt authentique à s'impliquer auprès des gens locaux comme partenaires sociaux, plutôt qu'uniquement comme chercheurs de l'extérieur (Castleden, Morgan et Lamb, 2012). La seconde étape impliquait la cueillette de données formelle au moyen d'entrevues et de séances d'information. La troisième étape consistait en une validation de la communauté, au moyen d'ateliers de cartographie participatifs et du partage des cartes fondées sur les images SAR ébauchées à l'aide de la connaissance locale de la glace de mer et des choix de voyage.

Dans le cadre de la seconde étape de recherche communautaire, trois rencontres publiques et quatre séances d'information en soirée ont été tenues. Le Hamlet Offices, la Hunters and Trappers Organizations et la Kitikmeot Inuit Association (KIA) connaissaient le projet de recherche et ont été invités à offrir leurs conseils sur la conception de la recherche et les protocoles locaux. Des entrevues semi-structurées sur le sujet de la traficabilité de la glace de mer et l'évaluation de l'image de la carte SAR ont été menées au cours des trois visites sur le terrain. Le public cible des entrevues enregistrées était des résidents âgés de plus de 14 ans utilisant activement (ou ayant utilisé) la glace de mer pour leurs déplacements et leur subsistance. Certaines entrevues ont également eu lieu avec des personnes qui possédaient moins d'expérience relative à la glace de mer, mais qui souhaitaient participer et possédaient des connaissances sur l'environnement. Des cartes prototypes fondées sur des images SAR (ci-après désignées les produits SAR) des conditions locales de la glace de mer ont été examinées dans chacune des entrevues. Au total, 47 personnes ont formellement participé au processus, et 20 personnes ont participé formellement à plus d'une reprise. Les détails relatifs à la méthodologie et aux questions utilisées pour les entrevues seront publiés dans un autre article (Segal et al., 2019).

Au cours des visites sur le terrain, les chercheurs ont également participé à des excursions de printemps et d'automne sur la glace de mer. Ces excursions ont eu lieu soit comme voyages guidés dans le cadre du présent projet de recherche, soit dans le cadre d'activités reliées à un autre projet POLAIRE. Pendant ces excursions, les résidents ont établi des zones et des caractéristiques particulières liées aux dangers de la glace de mer et à sa traficabilité. Trois entrevues formelles ont été menées sur la glace de mer.

Les analyses d'entrevue comprennent la transcription des entrevues enregistrées et l'identification des codes thématiques tirés des modèles d'information rencontrés au cours des entrevues (p. ex : la « glace pluriannuelle » et la « glace rugueuse »). Ces codes ont été réunis en thèmes, à l'aide du logiciel NVivo Pro 11. Puisque l'information relative à la glace de mer a été abordée par tous les participants, on perçoit d'importants chevauchements entre les thèmes.

## Produits SAR provenant de Sentinel-1

Les étapes initiales de la participation dans la communauté comprenaient le partage des produits SAR rudimentaires obtenus de la mission Sentinel-1. Dérivées d'images de zones locales, ces cartes rudimentaires montraient les conditions de la glace de mer dans une échelle de tons de gris, associée à une image SAR à canal unique (Figure 1). Des cartes en tons de gris reflétant les périodes d'automne (engel), d'hiver et de printemps (début de la fonte) ont été produites. Après une chaîne de traitement normal comprenant le retrait du bruit thermique, le filtrage de la granularité (bruit), le calibrage et la projection de la carte, ces cartes SAR en tons de gris présentaient des variations de tons relatives à l'intensité de l'énergie rétrodiffusée reçue par le SAR. Des cartes prototypes indiquant trois niveaux d'intensité de rétrodiffusion pendant l'hiver, lorsque l'intensité de rétrodiffusion de la glace de première année est connue pour être intimement liée à la rugosité de la surface, ont également été produites pour les régions de Cambridge Bay et de Kugluktuk (Figure 2). D'autres produits SAR découlant des images de Sentinel-1 ont été conçus et raffinés tout au long du processus d'implication dans la communauté. Renforcé par des communications régulières avec les membres de la communauté, ce processus itératif a permis de veiller à ce que le contenu et la conception des extrants (les cartes) soit le plus pertinent possible et compréhensibles pour les chasseurs, trappeurs et autres voyageurs sur glace.

This map shows imagery from a synthetic aperture radar (SAR) satellite image. PLEASE USE CAUTION WHEN USING THIS MAP AS IT IS A TEST PRODUCT ONLY. THE UNIVERSITY OF VICTORIA CANNOT CONFIRM ITS ACCURACY AT THIS TIME. Over sea ice, SAR responds mainly to the roughness of the ice surface, but also to its electrical properties (which are influenced by water and salt content). In general, rougher surfaces appear brighter (whiter). Water in windy areas will appear bright due to the roughness of waves, but calm water will appear black. Smooth, first year ice will also appear black. If you have any comments, suggestions, or questions about this product, please contact Becky Segal or Randy Scharien (rasegal@uvic.ca, or randy@uvic.ca)

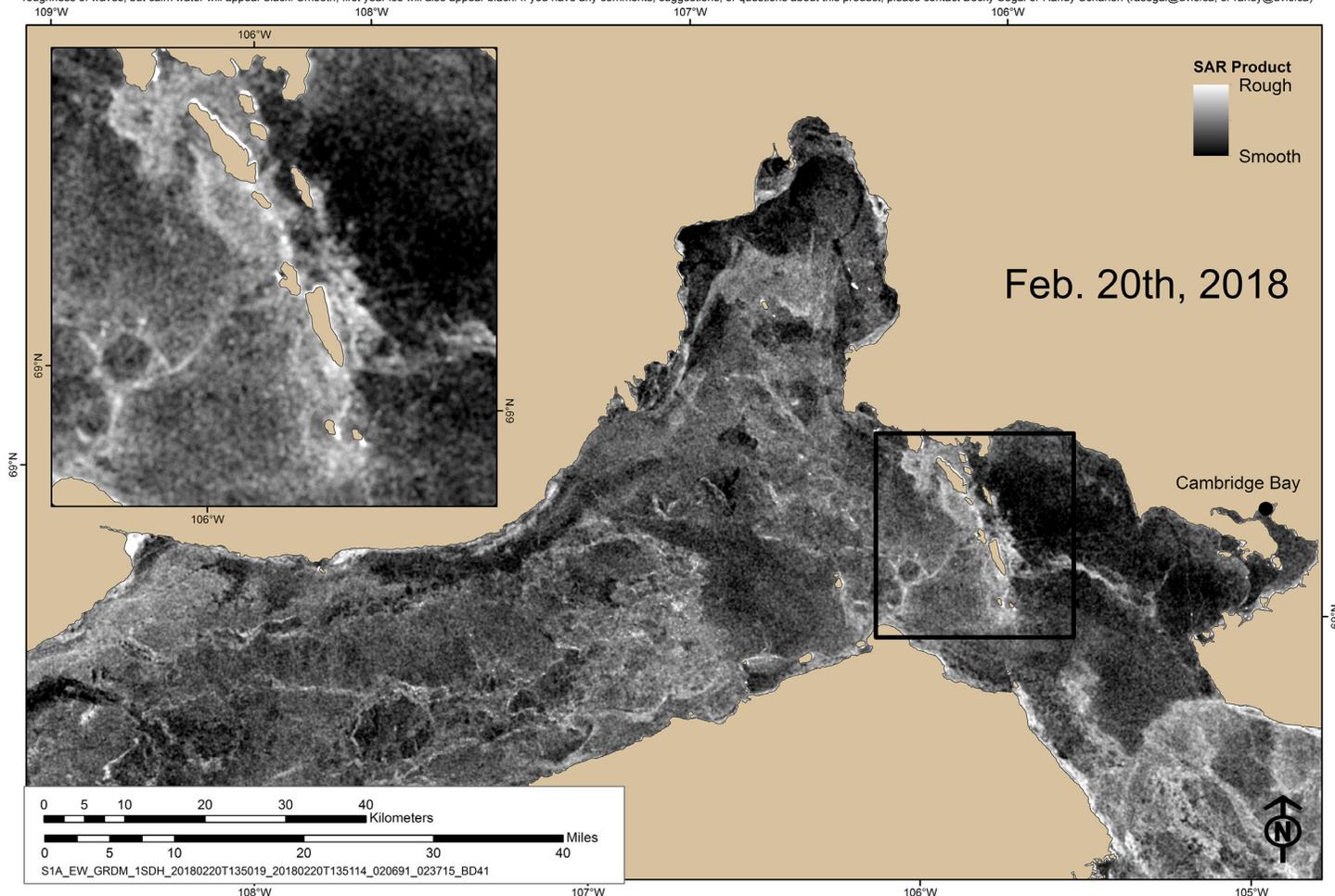


Figure 1 : Produit SAR en tons de gris de la région de Cambridge Bay dérivé d'une image de Sentinel-1 obtenue dans des conditions hivernales. Les zones marines montrent une intensité de rétrodiffusion passant de faible (noir) à élevée (blanc). La carte en médaillon montre une zone connue pour ses conditions de glace dangereuses.

La mission Sentinel-1 opère dans la fréquence de bande C, qui est la fréquence normalement utilisée par les organisations de cartographie de la glace pour produire des cartes sur la glace de mer. Les images SAR obtenues sur la fréquence de bande C peuvent délimiter différents types de glaces et caractéristiques de rugosité, comme les crêtes de pression et la glace cassée et reformée. Cette caractéristique est particulièrement utile pendant l'hiver, lorsque les effets de la fonte sur la rétrodiffusion sont absents. Au-dessus de la région de Kitikmeot, Sentinel-1 opère en mode « faisceau extra large » (Extra Wide Swath Mode, ou EW). Ce mode est conçu pour l'usage maritime, plus particulièrement pour produire des images de glace de mer avec un large faisceau. Les scènes en mode EW couvrent un faisceau de 400 km, avec une résolution spatiale nominale de 20 m sur 40 m (ESA, 2018). Deux

canaux de données sont obtenus pour chaque scène : un premier canal transmis et reçu en format horizontal (HH) et un second canal transmis et reçu en format horizontal vertical (HV). Chaque canal est constitué de cinq sous-faisceaux, qui, ensemble, couvrent un angle d'incidence pouvant aller de 19 à 47 degrés. Les données de Sentinel peuvent être téléchargées sur la plateforme en libre partage Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu/>). Les scènes en format EW se trouvant sur la plateforme sont traitées en résolution moyenne, format de produit standard niveau 1, avec un espace mesuré en pixel de 40 m sur 40 m. Dans ce format, il est possible d'obtenir une couverture des voies navigables se trouvant dans la région de Kitikmeot dans un délai d'au plus 14 jours (Figure 3).

This map shows imagery from a synthetic aperture radar (SAR) satellite image. PLEASE USE CAUTION WHEN USING THIS MAP AS IT IS A TEST PRODUCT ONLY. THE UNIVERSITY OF VICTORIA CANNOT CONFIRM ITS ACCURACY AT THIS TIME. Over sea ice, SAR responds mainly to the roughness of the ice surface, but also to its electrical properties (which are influenced by water and salt content). If you have any comments, suggestions, or questions about this product, please contact Becky Segal or Randy Scharien (rasegal@uvic.ca, or randy@uvic.ca)

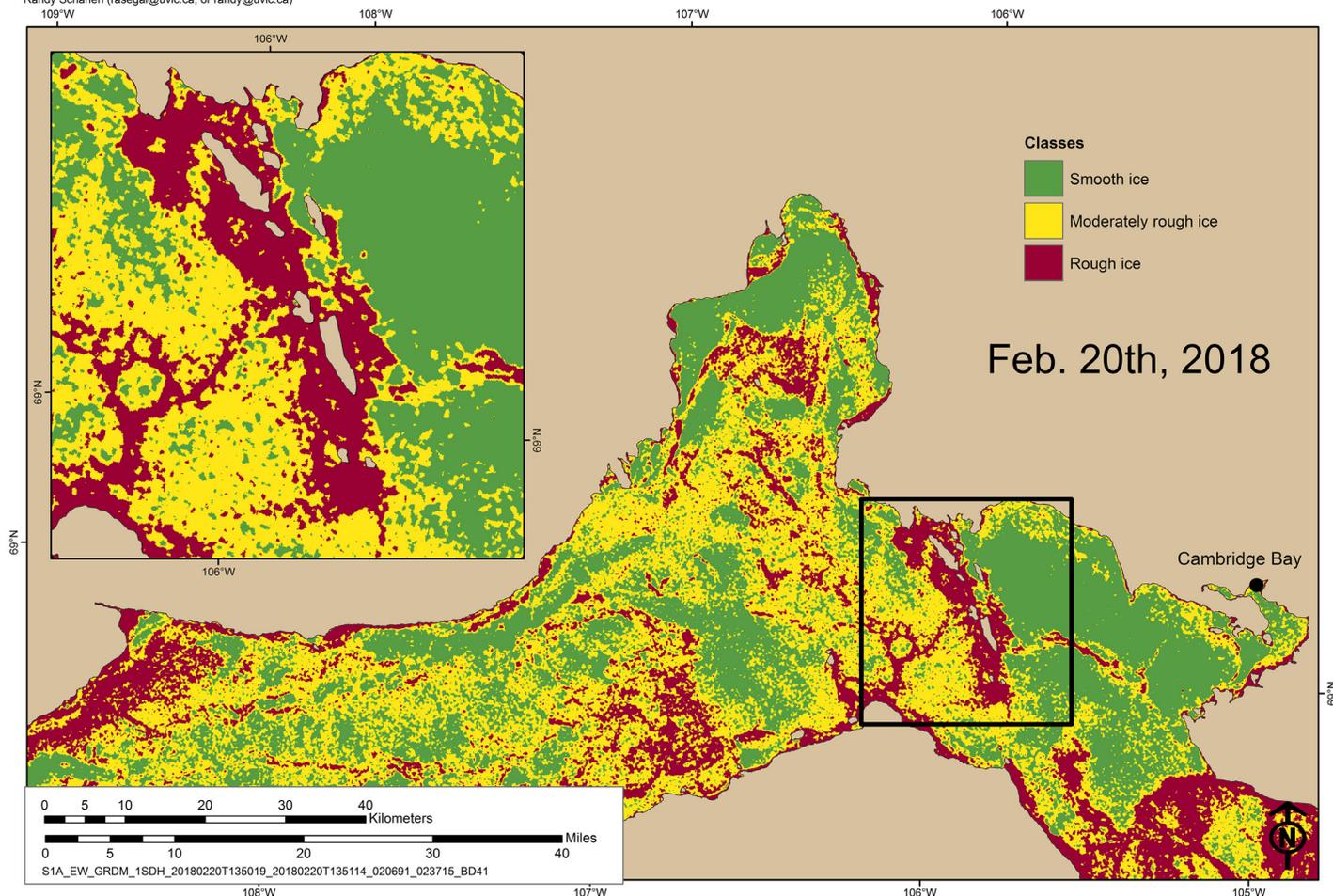


Figure 2 : Le produit SAR de la figure 1, après avoir établi le seuil de trois niveaux relatifs à la rugosité.

## Caractéristiques de la glace de mer

Les membres de la communauté ont ciblé plusieurs caractéristiques majeures et conditions saisonnières de la glace importantes dans un contexte de sécurité et de traficabilité. Ces caractéristiques comprennent :

- la glace lisse de première année ;
- la glace modérément rugueuse et la glace rugueuse de première année ;
- la glace pluriannuelle ;
- la glace de mer enneigée ;
- la glace mince ;
- la glace de début de saison ;
- la glace de fin de saison ;
- la boue glaciaire et l'eau sur la glace ;
- la glace rencontrant les navires ; et

- les fracturations de la glace, notamment les craques, les chenaux et les crêtes de pression.

Des renseignements relatifs à la présence des caractéristiques principales de la glace de mer et des conditions saisonnières de la glace de mer a à j se trouvent dans le tableau 1. Des renseignements relatifs à l'utilisation des caractéristiques principales de la glace de mer et des conditions saisonnières de la glace, de même que les changements observés et les conséquences potentielles, se retrouvent au tableau 2.

## Évaluation des produits SAR et importance de la rugosité de la glace de mer

Les membres de la communauté souhaitent posséder des renseignements provenant de SAR et d'autres technologies à propos de l'ensemble des caractéristiques de la glace de mer et des conditions

qui ont une incidence sur la sécurité et la traficabilité. Les images SAR présentent des renseignements sur la glace de mer qui sont pertinents pour les Inuits *Qaujimajatuqangit*, aussi désignés IQ. Plusieurs membres de la communauté croient également qu'il s'agirait d'un outil éducatif positif pour les écoliers et les citoyens qui ne peuvent pas observer directement les conditions de la glace de mer.

Il a été déterminé que la rugosité de la surface est la principale condition de glace de mer pour laquelle la cartographie par SAR présente des avantages substantiels. Par exemple, 91 % des participants souhaitent utiliser des cartes de rugosité par SAR. Ils sont d'avis que le produit évalué offre une observation de la traficabilité exacte et cohérente entre les routes existantes et la prévalence de zones de glace lisse. Les avantages anticipés des cartes de rugosité par SAR comprennent :

- la planification de routes sécuritaires et efficaces ;
- la possession des renseignements sur des zones moins connues ;
- l'évaluation exacte de la durée des voyages et/ou la réduction de leur durée ;
- l'aide aux recherches et sauvetages locaux et aux opérations des patrouilles de rangers ; et
- constituer une ressource éducative.

Les personnes possédant de l'expérience dans l'utilisation d'images SAR préfèrent les représentations en tons de gris (Figure 1), alors que les personnes novices avec ce type d'image préfèrent le produit défini par seuil indiquant les catégories de rugosité (Figure 2). Les catégories de rugosité favorites correspondent à la terminologie Inuinnaqtun locale pour la glace de mer — glace lisse : *manniqtuk hiku* ; glace modérément rugueuse : *manitutun hiku* ; et glace rugueuse : *manipiatuk hiku*.

D'autres caractéristiques d'intérêt de la glace de mer comprennent les zones de glace de mer mince (toutes saisons), les fractures de la glace de mer (toutes saisons) et les zones de boue glaciaire et d'eau stagnante (fonte du printemps). Toutefois, les zones de glace mince et de fractures de glace ne peuvent pas être détectées de façon fiable à l'aide de l'imagerie SAR en format EW de Sentinel-1, principalement en raison de sa faible résolution spatiale. Plus d'expérimentation sur

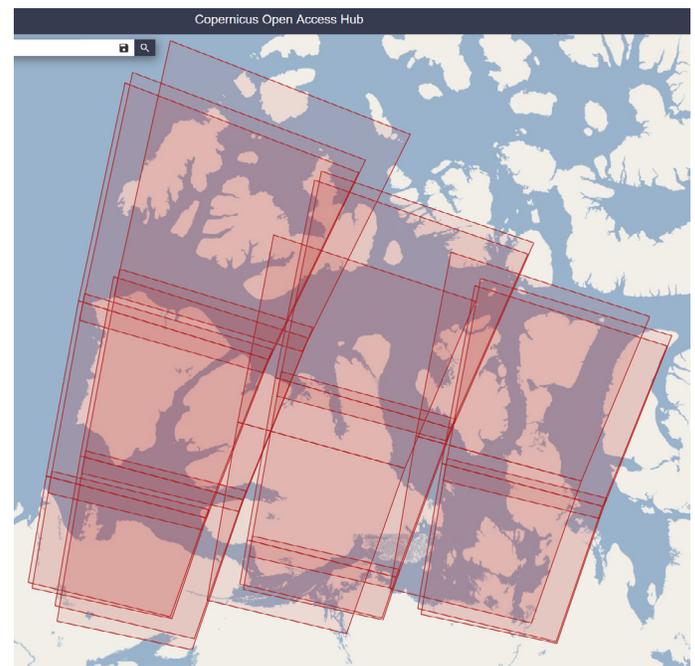


Figure 3 : Couverture de Sentinel-1 des voies navigables de la région de Kitikmeot en format EW, pour la période du 1<sup>er</sup> au 14 janvier 2018. 59 images téléchargées en format SAR standard niveau 1 sont accessibles sur la plateforme Copernicus Open Access Hub pour cette période.

l'utilisation d'un faisceau fin (p. ex. de RADARSAT-2) et d'une plus haute fréquence (p. ex. bande X) de données SAR est nécessaire. En l'espèce, les routes connues et les emplacements susceptible d'amincissement déterminés par des experts ont été cartographiés (Figure 4) et des zones vectorisées ont été ajoutées aux produits SAR. Les zones d'eau stagnante sur la glace de mer pendant la fonte du printemps sont appelées des mares de fonte. En raison de la petite taille de ces mares en comparaison de la résolution SAR, les mares de fontes ne peuvent pas être directement identifiées à l'aide des données SAR. Il est toutefois possible de prédire la fraction de la surface d'eau de la mare de fonte sur la glace de mer, appelée fraction de mare de fonte, par l'imagerie SAR en format EW de Sentinel-1 pendant la période hivernale (Scharien et al., 2017). Il est donc possible d'offrir aux communautés des produits SAR comprenant des prédictions relatives aux fractions de mare de fonte. Les zones de boue glaciaire pourraient être délimitées par l'emploi de données SAR plus évoluées, nécessitant des recherches futures.

Les images des conditions glaciaires saisonnières, comme la formation de la glace pendant la période d'engel, la débâcle des glaces pendant les conditions

Tableau 1 : Caractéristiques de la glace de mer et leur présence dans un contexte de glace dangereuse et de traficabilité. Voir le libellé pour l'identificateur de caractéristiques.

ID	Occurrence
a	Se développe dans les zones de vent faible et de courant faible pendant la période de gel, et dans les zones qui gèlent après la période de gèle (par exemple, les chutes de neige).
b	Se développe dans les zones de vents forts (environ 80-100 km/h)/de courants forts pendant la prise de la glace. Les dalles prennent le vent et exercent une plus grande force sur la glace. On les trouve souvent près du rivage. Les dalles peuvent fondre et diminuer la rugosité (généralement à la fin du printemps mais peut également se produire en automne).
c	Peu fréquent dans le golfe du Couronnement mais rencontré plus au nord.
d	La première tempête de neige après la prise de la glace remplit les dépressions. La neige s'accumule et peut recouvrir la glace de mer rugueuse. Les tempêtes d'hiver/printemps créent des monticules de neige durcis (rugosité de la neige). Devient mou lors de la fonte des neiges au printemps.
e	Les zones persistent pendant l'hiver ou sont saisonnières. Souvent des endroits similaires d'une année à l'autre. Les routes de glace deviennent minces tôt.
f	Se forme rapidement à proximité des communautés en raison des influences de l'eau douce et de la terre. Zones au nord du golfe du Couronnement et les régions où le courant est fort gèlent plus tard.
g	Moment plus variable que le gel. La débâcle de la rivière Coppermine accélère la fonte de la glace de mer en s'écoulant sur la glace (Kugluktuk). La neige retarde la fonte de la glace grâce à l'isolation.
h	Généralisé en automne/printemps ; seulement dans les zones d'eau en mouvement en hiver. S'accumule près du littoral au printemps, surtout s'il y a beaucoup de neige. Les bassins de fonte inondent la glace de mer à la fin du printemps, puis s'écoulent en laissant des cratères secs.
i	Commence lorsque les fissures près de la ville se transforment en chenaux suffisamment larges (9 à 12 m du rivage). Habituellement, en juin, lors des ruptures de la rivière Coppermine (Kugluktuk), ou début août (Cambridge Bay). Se termine avec la prise de glaces.
j	Se produisent dans les zones à fort courant et près des côtes, souvent dans des endroits similaires au fil des ans. Crêtes de pression de type 2 généralement loin de la terre. Les crêtes de pression se forment à la fin de l'automne/début de l'hiver et s'ouvrent au printemps (deviennent des fissures/plombs). La plupart des fissures apparaissent et s'élargissent au printemps. Les plombs se forment généralement à partir des fissures/crêtes de pression à la fin du printemps.

de fonte et la délimitation de la glace et de l'eau libre pendant ces périodes sont également intéressantes pour la communauté. Puisque les données de Sentinel-1 sont gratuites et en libre accès, il est possible de fournir des séquences d'image. Il pourrait toutefois être difficile d'interpréter le contenu des images pendant ces périodes de transition.

Une évaluation du lien entre la rugosité de la surface et la rétrodiffusion du SAR de Sentinel-1 a été menée à l'aide de données obtenues par laser à balayage aéroporté (ALS) de la hauteur des surfaces quadrillées. En avril 2017, des données ont été obtenues grâce à un partenariat avec la campagne terrain et aéroportée de ESA CryoVEx/EU ICE-ARC 2017. Cette campagne comportait une expérience de validation de CryoSat-2 (CryoVEx) et un projet financé par l'Union européenne (ICE-ARC) visant à valider des satellites (CryoSat-2, Sentinel-3 et SARAL/AltiKA) et à surveiller la glace de

mer. Une partie de la campagne aéroportée de CryoVEx/EU ICE-ARC a été lancée à Cambridge Bay et s'est dirigée, au moyen de la SFC Alert, vers Svalbard, en Norvège. Un Twin Otter de la British Antarctic Survey, équipé d'instruments de télédétection, a réalisé des vols à partir de l'aéroport de Cambridge Bay (YCB) concordant avec la cueillette de données de terrain du 5 avril au 8 avril 2017. Les vols ont ensuite été réalisés au-dessus de points de cheminement dans le canal M'Clintock en transit vers Resolute Bay le 11 avril 2017. Les données ALS traitées ont été livrées sous forme de nuée de points géolocalisés, en ligne de 200 à 300 mètres de largeur à pleine résolution (1 m par 1 m). Les nuées de points comprennent l'heure, la latitude, la longitude, la hauteur donnée relative à l'ellipsoïde de référence WGS84, l'amplitude et le nombre séquentiel de points de données par ligne de balayage (1-251).

Tableau 2 : Utilisation des principales caractéristiques et conditions de la glace de mer et changements observés.

ID	Utilisation	Changements et conséquences
a	Facilite les déplacements rapides en motoneige (environ 50-110 km/h), bon l'efficacité énergétique et l'usure légère des équipements.	Ces dernières années, les conditions sont devenues plus difficiles.
b	Voyage lent et difficile (environ 5-30 km/h ; zigzag et raccourcissement de remorquage) ; dur pour l'équipement ; moindre efficacité énergétique ; dur pour naviguer par temps sombre/mauvais. Zones de répartition des ours polaires et bon pour les abris d'urgence. Moins prévisible dans les déplacements ; risque accru d'accidents et de pannes. Peut être plus rude ces dernières années, ce qui exacerbe le risque d'accidents ou de pannes, consommant du temps, et l'augmentation des coûts.	Un gel retardé peut entraîner la formation se produit à la période la plus venteuse de l'année.
c	Plus lisse que la rugosité, mais plus rugueuse que la lisse. Zone de parcours de l'ours polaire ; glace bonne pour l'eau potable.	Pas discuté ; présence trop rare près de la ville.
d	Modifie la surface de la glace pour la rendre plus lisse/plus rugueuse. Isole la mer et contrôle l'épaisseur de la glace. La neige d'automne fait voyager plus facile. L'accumulation de neige peut permettre à la glace rugueuse d'être traficable. La neige dure et la neige molle rendent les déplacements plus faciles plus difficile.	Changements possibles en raison de la fréquence des tempêtes hivernales.
e	Risque de chute à travers la glace de mer ; provoquer des embrassades chez les voyageurs les rivages.	L'amincissement lié au réchauffement de l'océan et au changement les modèles de chutes de neige. Nouvelles/grandes zones d'eau libre maintenant trouvés ; par exemple, la région de Cape Krusenstern.
f	L'utilisation commence lorsque la glace de mer a une épaisseur de 5 à 15 cm (tolérant aux risques et voyageurs expérimentés à proximité des communautés) ou environ 0,6-0,9 m d'épaisseur (plus loin de la terre). Les déplacements sur glace sont préférables à les déplacements terrestres en raison de l'absence relative de couverture neigeuse.	Retardé/prolongé : utilisation en septembre/octobre maintenant reporté à novembre/décembre.
g	Utilisez les extrémités lorsque les fissures ou les fils deviennent trop dangereux (juin ou juillet). La plupart s'arrêtent lorsqu'il est difficile d'y accéder depuis à terre mais toujours en sécurité.	Le délai est naturellement variable, mais peut être de environ 1 mois plus tôt et plus rapidement.
h	Les trous de fusion et les bassins de fusion profonds indiquent un amincissement rapide la glace de mer ; il faut l'éviter et dissuader de nombreuses personnes voyage. Les motoneiges peuvent rester coincés dans la boue ou l'eau, se briser par les couvercles de glace des bassins de fonte recongelés et dérapage, ou s'arrêter courir si la courroie est mouillée. Les traîneaux peuvent tourner en raison de la perte de de friction sur les bassins de fusion. Les voyages par temps frais peuvent être plus facile lorsque la neige fondue ou la neige fondue molle est plus ferme.	La gadoue côtière est devenue un problème plus important ces dernières années.
i	Il faut prévoir un voyage en bateau pour éviter d'être coincé à l'intérieur/en dehors de la communauté par la glace. Allongement de la saison de navigation bénéfique pour ceux qui ont des bateaux, mais pas pour ceux qui sont sur la glace activités. Doit être conscient du déplacement des glaces (en particulier MYI) causant des vagues dangereuses pour les petits bateaux.	La saison sans glace est plus longue d'environ un mois que par le passé (les deux communautés). Les gens qui font plus de bateau voyages. Navigation plus tôt au printemps et plus tard en automne (mi-octobre à Cambridge Bay, mi-novembre à Kugluktuk).
j	Utilisés comme points de repère pour identifier les lieux. Régulièrement croisés lorsqu'il est étroit, sinon il est traversé par un pont naturel de glace de mer, en faisant un pont de glace de mer (en dernier recours), ou en sautant un motoneige (saut à l'eau). Lieu de chasse en mer les animaux. Possibilité de tomber à travers des fractures en eau libre (assez courant) ; certains portent des combinaisons de flottaison au printemps comme une précaution. Il peut être difficile de voir dans l'obscurité ou la météo.	La plupart n'ont pas remarqué de changements. De nouvelles fissures et fissures en zigzag (autrefois droites) observées. Les fissures près de Locker Point se sont déplacées vers le nord sur les dernières environ 30 années de quelques centaines de mètres, mesurée par un chasseur de Kugluktuk à l'aide d'un GPS. Le nombre de crêtes de pression peut avoir augmenté au cours des 10 à 15 dernières années (Kugluktuk). Pression Les crêtes étaient autrefois droites de Long Point à la continentale ; récemment, elle s'est déplacée.

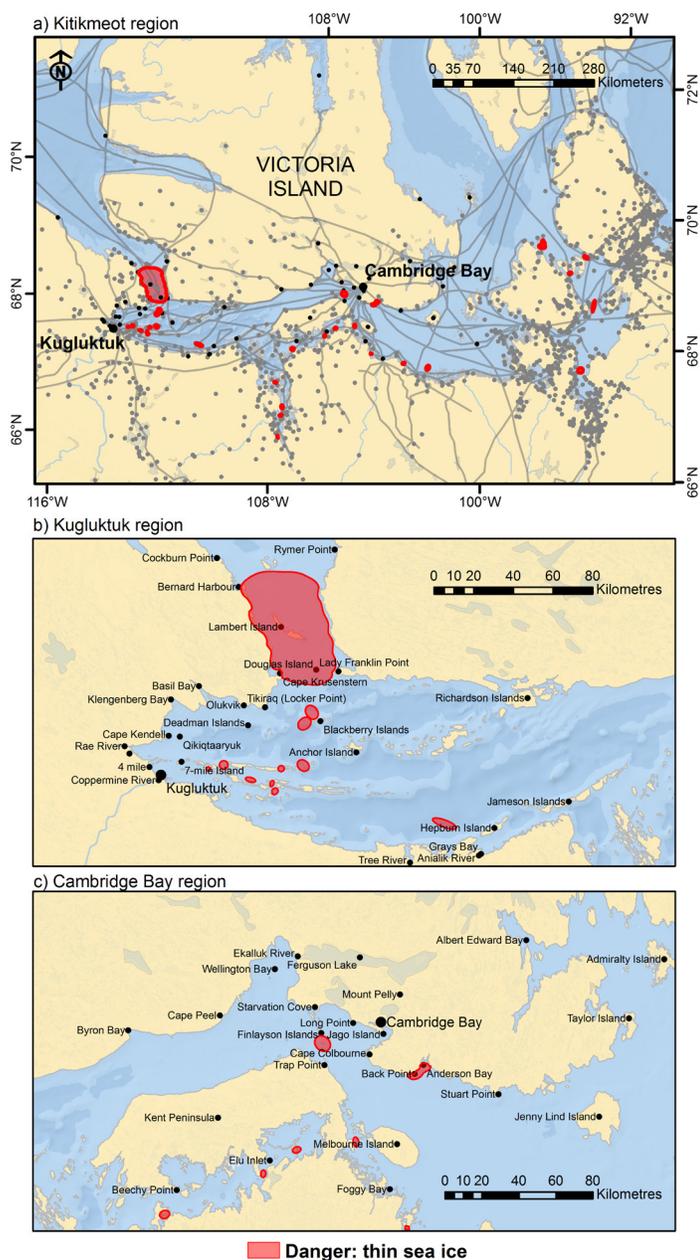


Figure 4 : Cartes affichant des zones dangereuses relevées par des experts locaux : a) utilisation de la glace de mer, et a-c) emplacements de glace de mer mince ou d'eau libre dans trois régions distinctes. Ceci ne constitue pas une liste complète des zones dangereuses, certaines d'entre elles pouvant apparaître de façon saisonnière, à l'année longue ou en raison d'un climat changeant. Les principales routes (lignes grises) et les lieux importants (points gris) ont été déterminés par le Inuit Heritage Trust (<http://iht.ca/eng/iht-proj-plac.html>).

Des images coïncidentes dans l'espace de LiDAR et de Sentinel-1 ont été utilisées du 9 avril au 20 avril 2017. La rugosité fondée sur LiDAR a été mesurée dans des cellules de 1,2 x 0,4 km le long de la ligne de passage

comme déviation de la moyenne quadratique d'un avion ayant un ajustement optimal :

$$\text{rugosité} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2}$$

où  $z_i$  représente la hauteur de la surface LiDAR quadrillée aux points  $n$  de la grille dans une région d'intérêt (RI), et  $\bar{z}$  représente les hauteurs moyennes de la grille dans la même RI. La rugosité établie par les données de Sentinel-1 a été définie comme la rétrodiffusion moyenne en polarisation HH, moyennée dans la même RI.

La rugosité de la glace de mer est comparée visuellement (Figure 5) et quantitativement (Figure 6) à la rétrodiffusion HH de Sentinel-1. Il existe un lien significatif entre la rugosité et la rétrodiffusion ( $R^2$  de 0,61 ;  $p < 0,0001$ ). Dans la figure 5, les zones lisses correspondent à des valeurs de rétrodiffusion faibles, alors que les zones rugueuses correspondent à des valeurs de rétrodiffusion élevées. On retrouve également des emplacements où la glace de mer pluriannuelle présente une rugosité modérée, mais une rétrodiffusion élevée. Ce lien déroutant est dû à la diffusion volumétrique retrouvée à l'intérieur de la glace pluriannuelle rafraîchie. Cela a une incidence sur le lien retrouvé à la figure 6. À l'avenir, il serait utile de prendre en compte la présence de glace de mer pluriannuelle (p. ex. par un masque de classification) ou d'employer une source de donnée complémentaire pour quantifier la rugosité. En ce qui a trait à la glace de première année, qui constitue le principal type de glace entourant les communautés de Cambridge Bay et de Kugluktuk, il existe un lien fort entre la rétrodiffusion et la rugosité. À la lumière de la validation en cours, tous les prototypes de produits SAR fournis aux communautés sont accompagnés d'un avertissement relativement à leur exactitude.

## Transfert des connaissances

L'implication de la communauté et la pertinence constituent des facteurs clés de notre étude. Les cartes, composantes essentielles de l'implication et de la mobilisation des connaissances, ont servi d'outils de communication tactiles et visuels. Au cours de l'étape de cueillette de données, les répondants ont indiqué des caractéristiques du paysage sur les cartes et ont partagé leurs connaissances de la glace de mer avec

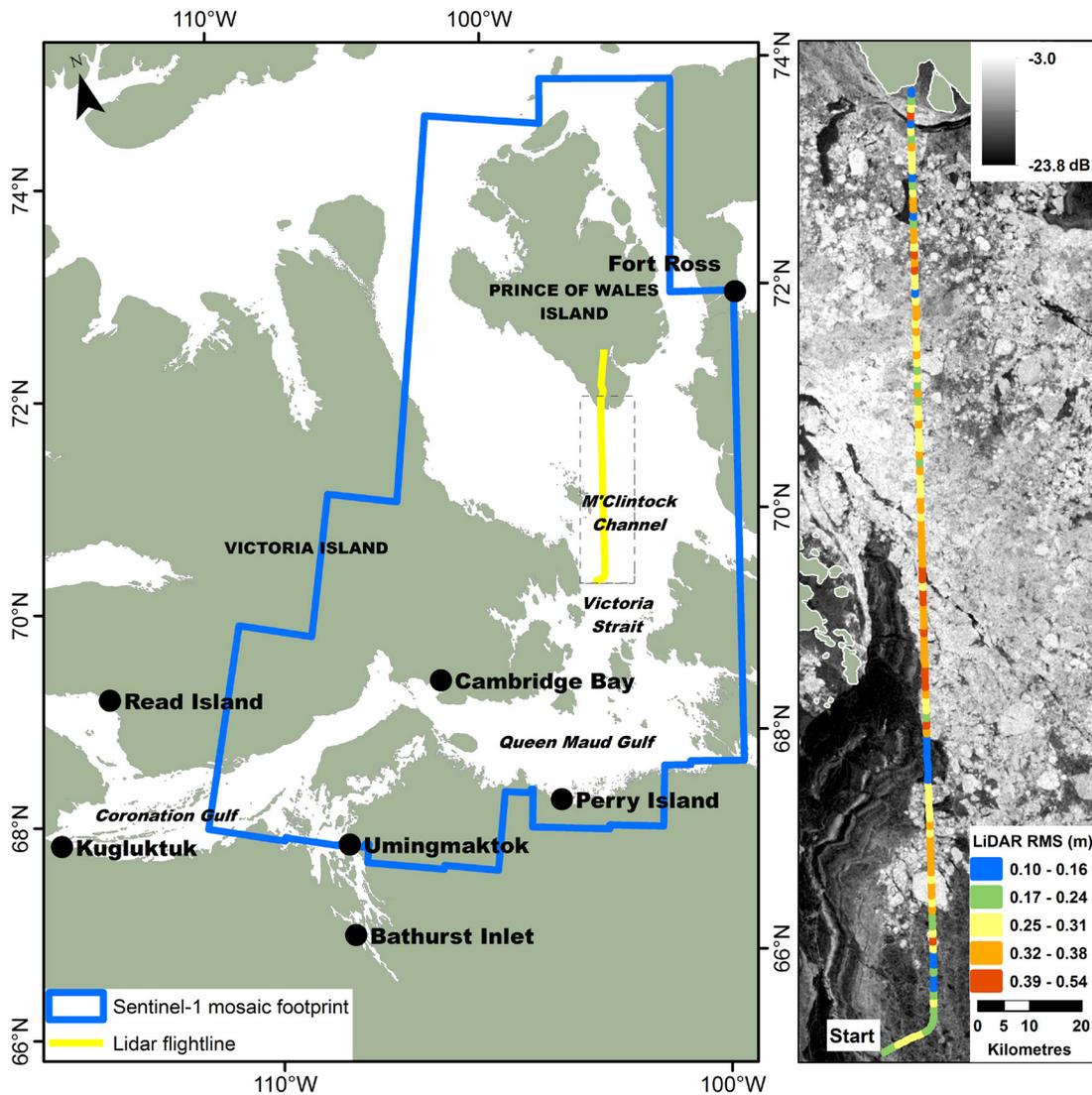


Figure 5 : (Gauche) Emplacements des données SAR de Sentinel-1, des données LiDAR et carte en médaillon (ligne pointillée noire). (Droite) Rugosité dérivée des données de LiDAR superposée sur l'imagerie par SAR.

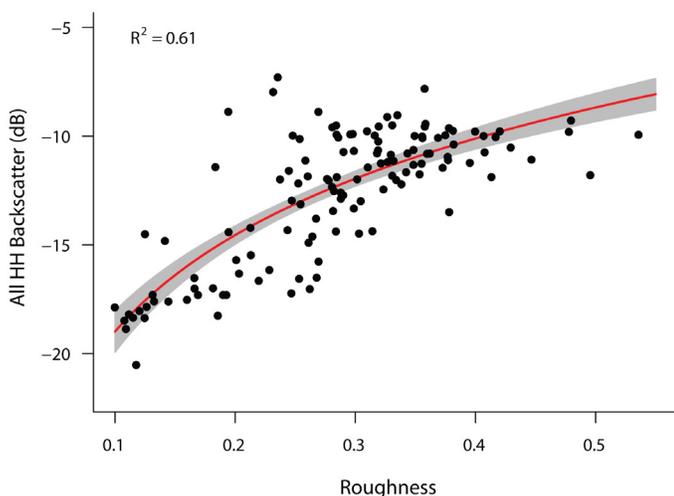


Figure 6 : Lien entre la rétrodiffusion HH de Sentinel-1 et la rugosité de la surface de la glace de mer dérivée des données LiDAR.

l'équipe de recherche. Un peu plus tard, lors du retour dans les communautés avec les produits SAR, des échanges d'information semblables ont eu lieu dans le cadre d'ateliers et dans des endroits publics, comme des épiceries locales, où les chercheurs ont installé une table d'information. Les cartes ont donc servi de produit (source d'information), mais également de processus (comme outil pour faire participer la communauté).

Ces cartes ont été (et sont encore) remises à la communauté de trois façons :

1. sous forme de copie papier imprimée, pour être affichées dans la communauté ;

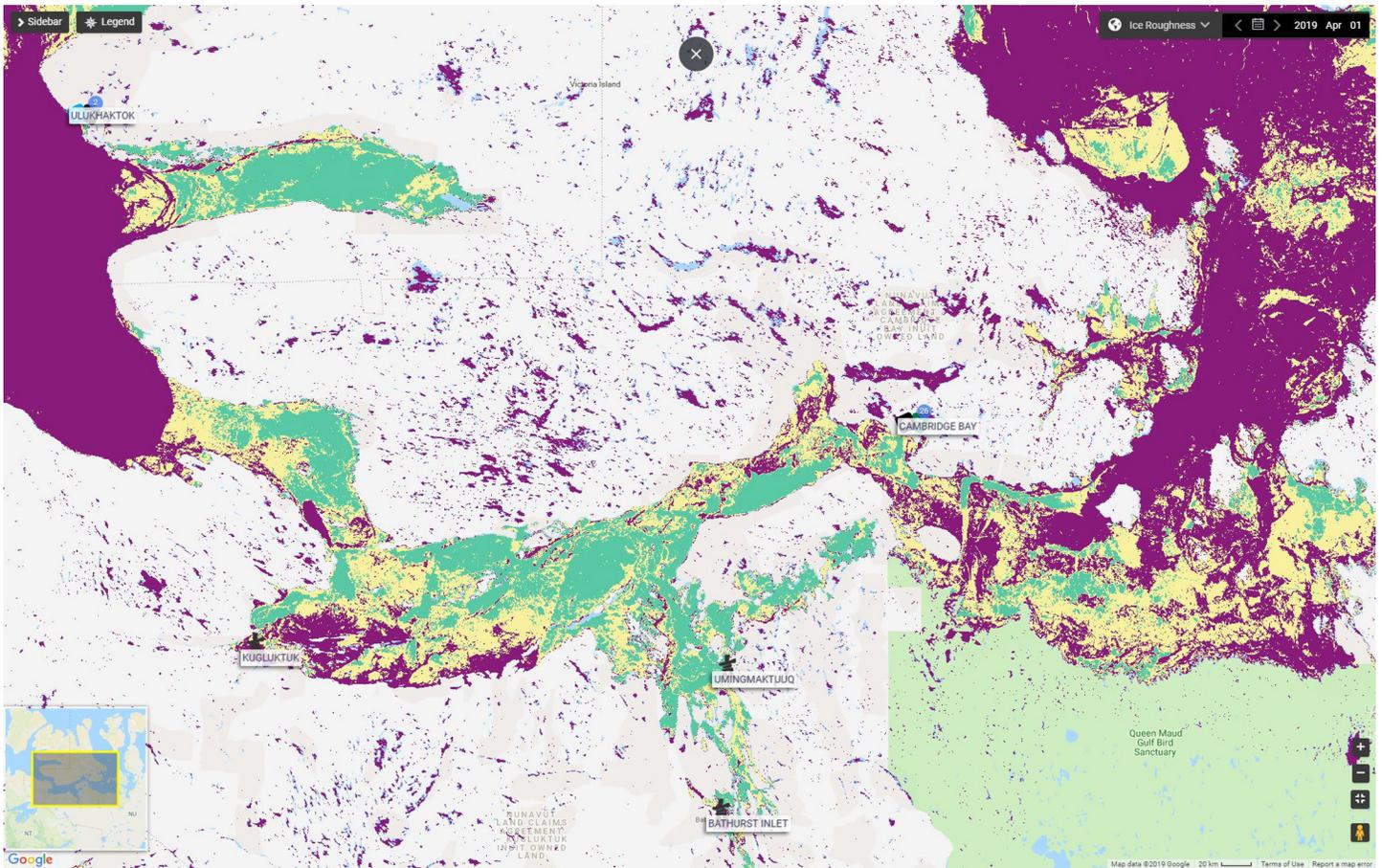


Figure 7 : Publication du produit relatif à la rugosité de la glace dans SIKU. Un nouveau masque pour la terre est en développement afin d'inclure les lacs dans le processus de masquage.

2. sous forme d'image numérique, dans un format de compression d'image entraînant des pertes, pour être facilement envoyées par courriel et sur les médias sociaux ; et
3. sur SIKU, une plateforme de connaissance Inuit Wiki et de cartographie sociale, développée par la Artic Eider Society (AES : <https://arcticeider.com/en/about>).

L'éditeur de code Google Earth Engine (GEE) permet le développement indépendant et le partage de scripts. Il offre également beaucoup plus de puissance de calcul que celle à laquelle peut généralement avoir accès un laboratoire typique, ce qui permet un accès facile aux produits d'image. En traduisant les algorithmes développés dans la plateforme Javascript de GEE, nous sommes en mesure de partager tant le script que les images finales avec SIKU, donnant ainsi accès aux communautés aux données sur la rugosité de la glace de mer. En raison des retards du Earth Engine, il y a actuellement un délai d'environ un à trois jours

entre la disponibilité des images de Sentinel-1 et leur publication sur SIKU.

La bande de données HH de Sentinel-1 inscrite dans Earth Engine est prétraitée à l'aide de la boîte à outils de Sentinel-1. Cela signifie que le retrait du bruit thermique, l'étalonnage radiométrique et les étapes de correction du terrain ont lieu avant l'exécution de nos scripts. Pour être utiles pour la navigation dans un contexte de glace de mer, nos scripts filtrent l'ensemble des images par date et masquent la terre. Cela simplifie également la création des cartes de rugosité, qui classent la rétrodiffusion de la bande-HH en trois catégories : lisse, moyenne et rugueuse. Les produits d'image non classés et classés sont publiés dans l'application SIKU, permettant aux utilisateurs de choisir entre une image en tons de gris ou un produit simplement classé par couleur (Figure 7). Puisqu'il est possible de partager les scripts de Earth Engine et qu'ils peuvent être générés très rapidement, ils sont envoyés directement à AES pour être publiés dans l'application SIKU. Cette publication est faite à la demande des

utilisateurs, ce qui leur permet de choisir les dates les intéressantes.

## Conclusions

Ce projet a adopté une approche multidisciplinaire et participative novatrice. L'équipe de recherche a travaillé de concert avec des participants de la communauté pour établir les besoins relatifs aux données sur la glace de mer, réaliser une validation des conclusions par la communauté et créer ensemble des façons efficaces de propager les données sur la glace de mer à des fins pratiques et d'implication dans la communauté. Ce type d'approche répond aux intérêts stratégiques du Nunavut et du Canada, soit d'offrir des connaissances utiles afin de permettre des déplacements avisés dans les zones arctiques marines et de répondre à la mission canadienne plus vaste multipartiste, multiculturelle et d'inclusion des autochtones.

La rugosité de la glace de mer est un paramètre d'intérêt essentiel pour la population de la région de Kitikmeot et plus particulièrement pour les communautés de Cambridge Bay et de Kugluktuk, qui utilisent la glace de mer pour leurs déplacements. Les renseignements sur la rugosité complètent les Qaujimajatuqangit Inuit et offrent une meilleure compréhension des conditions glaciaires en cette période de changements sociaux et de conditions environnementales incertaines. Les données SAR de la mission de Sentinel-1, une mission SAR phare offrant de l'imagerie gratuitement et en libre accès, donnent des renseignements sur la rugosité de la surface de la glace de première année et les emplacements de la glace pluriannuelle pendant la période hivernale. Grâce à cette information, des cartes, sous format papier et numérique, peuvent être produites, améliorant ainsi la sécurité et la traficabilité sur la glace de mer et fournissant un outil éducatif.

## Considérations d'ordre communautaire

Les connaissances autochtones et les renseignements de la communauté sur les routes associées à la glace de mer, les dangers et obstacles des voyages et les perspectives à propos des récents changements ont été recueillis à Cambridge Bay et Kugluktuk. Cette connaissance, ces renseignements et ces perspectives ont été utilisés pour la conception du projet. Les produits d'images et de cartes qui en résultent sont offerts aux membres des communautés de Cambridge Bay et de Kugluktuk.

## Remerciements

Les auteurs remercient Savoir polaire Canada (POLAIRE), le CRSNG (financement accordé à R.K. Scharien), le CRSH (financement accordé à C.-L. Tam), et ACUNS, la SGRC, AINA et le Programme de formation scientifique dans le Nord (financement accordé à R.A. Segal) pour le financement accordé, ainsi que la Station canadienne de recherche dans l'Extrême-Arctique pour le soutien logistique offert. Nous remercions la Ekaluktutiak et la Kugluktuk Hunters & Trappers Organizations, la Kitikmeot Inuit Association et Hamlets de Cambridge Bay et de Kugluktuk pour leurs conseils et leur aide. Nous remercions Ocean Networks Canada et le Service canadien des glaces de leur soutien à la recherche et leur collaboration.

## Références

- Castleden, H., Morgan, V.S., Lamb, C. 2012. "I spent the first year drinking tea": Exploring Canadian university researchers' perspectives on community-based participatory research involving Indigenous peoples. *The Canadian Geographer*, 56(2):160–179. Retrieved from: <https://doi.org/10.1111/j.1541-0064.2012.00432.x>
- Druckenmiller, M.L., Eicken, H., Johnson, M.A., Pringle, D.J., Williams, C.C. 2009. Toward an integrated coastal sea-ice observatory: System components and a case study at Barrow, Alaska. *Cold Regions Science and Technology*, 56(2–3):61–72. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2008.12.003>
- ESA. 2016. Sentinel-1 radar mission. European Space Agency. Retrieved from: <https://www.copernicus.eu/en/media/images/sentinel-1-radar-mission>
- ESA. 2018. Sentinel-1 SAR user guide introduction. Retrieved from: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar>
- European Commission. No date. Copernicus: Europe's eyes on Earth. Retrieved from: <https://www.copernicus.eu/en/media/images/sentinel-1-radar-mission>
- Ford, J.D., Couture, N., Bell, T., Clark, D.G. 2018. Climate change and Canada's north coast: research trends, progress, and future directions. *Environmental Reviews*, 26(1):82–92. Retrieved from: <https://doi.org/10.1139/er-2017-0027>

Gauthier, Y., Tremblay, M., Bernier, M., Furgal, C. 2010. Adaptation of a radar-based river ice mapping technology to the Nunavik context. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 36(S1):S168–S185. Retrieved from: <https://doi.org/10.5589/m10-018>

Laidler, G.J., Hirose, T., Kapfer, M., Ikummaq, T., Joamie, E., Elee, P. 2017. Evaluating the Floe Edge Service: How well can SAR imagery address Inuit community concerns around sea ice change and travel safety? *The Canadian Geographer*, 55(1):91–107. Retrieved from: <https://doi.org/10.1111/j.1541-0064.2010.00347.x>

Scharien, R.K., Segal, R., Nasonova, S., Nandan, V., Howell, S.E.L., Haas, C. 2017. Winter Sentinel-1 backscatter as a predictor of spring Arctic sea ice melt pond fraction. *Geophysical Research Letters*, 44. DOI: 10.1002/2017GL075547

Segal, R.A., Scharien, R.K., Duerden, F., Tam, C.-L. 2019. “The best of both worlds” - Connecting remote sensing and Arctic communities for safe sea ice travel - Part 1 - Uncertain trafficability. (in preparation for submission to *Applied Geography*)

# TRAITEMENT DES EAUX GRISES ET RÉEMPLOI DANS LES ÉDIFICES ET COMMUNAUTÉS NORDIQUES – RÉSULTATS D’UN PROJET-PILOTE

N.A. Poirier<sup>1\*</sup> and R. Pristavita<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Terragon Environmental Technologies Inc., Montréal, Québec, Canada

\* [nicole\\_a\\_poirier@outlook.com](mailto:nicole_a_poirier@outlook.com)

## Résumé

Les eaux grises sont des eaux usées qui proviennent des douches, des baignoires ou de la lessive. Comparativement aux eaux noires (égout), les eaux grises sont moins contaminées puisqu’elles ne comprennent pas les eaux usées des toilettes, des urinoirs, des éviers de cuisine et des lave-vaisselles. Dans plusieurs régions du monde où l’eau n’est pas abondante, les gens utilisent les eaux grises pour la chasse d’eau des toilettes, l’irrigation, la lessive et le nettoyage. De nombreux codes de plomberie et de bâtiment prévoient des normes pour veiller à la sécurité de l’utilisation des eaux grises traitées à diverses fins.

Généralement, le Nunavut n’a pas de pénurie d’eau, mais celle-ci est dispendieuse. Particulièrement pour les petites communautés qui ne possèdent pas de réseaux de canalisation d’eau, le coût élevé de l’eau est dû à la livraison de l’eau par camion dans chaque maison et entreprise et à la collecte par camion des eaux usées de ces bâtiments. Par conséquent, dans tout le Canada, c’est au Nunavut qu’on utilise le moins d’eau par personne. Le réemploi des eaux grises dans les immeubles et les communautés nordiques réduirait la quantité d’eaux usées générées et ferait en sorte que plus d’eau potable livrée par camion serait réservée aux activités qui nécessitent réellement cette qualité

d’eau, comme la consommation, la préparation de la nourriture et les bains.

Le présent projet étudie le potentiel de traitement et de réemploi des eaux grises dans les communautés nordiques grâce à un nouveau système de traitement des eaux grises conçu pour le Nord. Ce nouveau système a été installé dans une résidence de type triplex de la Station canadienne de recherche dans l’Extrême-Arctique (SCREA) à Cambridge Bay, au Nunavut. Pendant le projet-pilote, le système de traitement des eaux grises a été en mesure de satisfaire aux exigences d’une norme généralement acceptée pour les eaux grises. Cet article traite de la qualité et du coût par mètre cube des eaux traitées (m<sup>3</sup>) et présente les résultats d’une enquête réalisée chez les résidents et les propriétaires d’entreprises de la communauté sur leur point de vue à propos du traitement et du réemploi des eaux grises.

## Introduction

Cambridge Bay est un hameau situé sur l’Île Victoria, dans la région de Kitikmeot au Nunavut, Canada. En 2016, la population était de 1 716 habitants et la majorité des résidents étaient autochtones (Inuit) (Statistiques Canada, 2016). En raison du pergélisol et

### Références suggérées :

Poirier, N.A. et Pristavita, R., 2019. Traitement des eaux grises et réemploi dans les édifices et communautés nordiques – résultats d’un projet-pilote. *Savoir polaire* : Aqhaliat 2019, *Savoir polaire Canada*, p. 74–84. DOI: 10.35298/pc.2019.07

du climat rigoureux du Nord, les réseaux de canalisation d'eau (souterrains ou de surfaces) et les réseaux collecteurs d'eaux usées sont extrêmement dispendieux et peu pratiques. Dans la plupart des communautés du Nunavut, des camions livrent l'eau potable et collectent les eaux usées des maisons et entreprises, qui sont équipées de réservoirs d'eau et d'eaux usées distincts. L'eau potable provient d'eau de surface traitée et les eaux usées sont éliminées dans un étang d'épuration situé à proximité. Ces services par camions sont offerts par le hameau moyennant une contrepartie monétaire, à différents taux pour les clients résidentiels et commerciaux. Ces taux sont fortement subventionnés par le gouvernement du Nunavut. Ces subventions sont nécessaires puisque le coût des services d'eau au Nunavut est de plus de 10 fois la moyenne de 5 \$ par mètre cube (m<sup>3</sup>) des services d'eau et d'eaux usées des autres régions canadiennes. L'utilisation résidentielle de l'eau par personne au Nunavut est généralement d'environ 100 litres par jour (l/jour), soit environ le tiers de la moyenne canadienne (Daley et al., 2014) et le coût de l'électricité produite au diesel non subventionné est d'environ 5 à 10 fois plus élevé que dans les autres régions canadiennes.

Les eaux grises utilisées pour les bains et la lessive représentent normalement environ 50 % de la consommation d'eau potable (Mortillaro, 2016). Le traitement et l'entreposage des eaux grises dans un réservoir distinct permettent de les utiliser à des fins qui ne nécessitent pas d'eau potable (c.-à-d. pour la chasse d'eau de toilette et la lessive). Cette approche aurait pour effet de réduire le coût de l'eau et de réserver l'eau propre pour les activités qui nécessitent réellement une qualité d'eau potable (pour la consommation, la cuisine et les bains). Le réemploi des eaux grises diminue également le volume d'eau potable par personne requis et le volume d'eaux usées générées. Dans les communautés nordiques, le réemploi des eaux grises pourrait atténuer la charge sur les installations de traitement d'eau et les services de livraison par camion, qui sont exploités au maximum de leur capacité dans certaines communautés. Les utilisateurs d'eau commerciaux pourraient être particulièrement intéressés par le réemploi des eaux grises, considérant que pour eux, le coût de l'eau est quatre fois plus élevé que pour les consommateurs résidentiels, même avec les subventions gouvernementales. Le traitement et le réemploi des eaux grises suscitent un grand intérêt dans plusieurs régions d'Amérique du Nord en raison des pénuries d'eau créées par les sécheresses ou les

inadéquations entre la disponibilité de l'eau et les besoins domestiques, agricoles et industriels. Toutefois, le traitement et le réemploi des eaux grises a rarement été une option considérée pour le Nord, en raison des difficultés techniques, pratiques et sociales que cela représente.

Un nouveau système de traitement des eaux grises a été développé et testé pendant une période de six mois avant le présent projet-pilote (Poirier et Pristavita, 2017). Pour évaluer la pertinence du traitement des eaux grises dans un contexte nordique, le système a été transporté à Cambridge Bay en novembre 2018 et installé dans une résidence de type triplex (Figure 1) à la Station canadienne de recherche dans l'Extrême-Arctique (SCREA). Une enquête portant sur les résidents et les propriétaires d'entreprise du Nord a également été réalisée pour obtenir leur point de vue sur le traitement et le réemploi des eaux grises.



Figure 1 : Résidence de type triplex de la Station canadienne de recherche dans l'Extrême-Arctique, où le système de traitement des eaux grises a été installé.

## Description du système de traitement des eaux grises

Le système de traitement des eaux grises présenté à la figure 2 est environ de la taille d'un réfrigérateur. Pour ce projet-pilote, le système a été utilisé dans le triplex à occupation multiple de la SCREA, qui peut héberger jusqu'à 24 personnes, soit 8 personnes dans chacune des trois résidences. Ce système est adéquat pour traiter la totalité des eaux grises générées dans le triplex, en fonction de sa capacité de traitement (1 440 l/jour), l'occupation normale de l'immeuble et les taux d'utilisation d'eau mesurés des appareils sanitaires à haute efficacité qui génèrent des eaux grises (les douches et les machines à laver).



Figure 2 : Système de traitement des eaux grises installé dans le triplex.

Le système de traitement des eaux usées fonctionne sur le principe de l'électrochimie et ne nécessite aucun ajout de produit chimique (ce qui pourrait poser problème pour les communautés nordiques) ni l'utilisation de traitements biologiques, de filtres ou de membranes (qui nécessitent généralement beaucoup d'entretien). Le système repose sur un réacteur d'électrocoagulation (EC) breveté, suivi d'une unité de réduction de la turbidité novatrice, puis d'une étape de polissage de l'eau final et enfin, d'une unité de désinfection. L'EC est utilisé pour retirer la majeure partie de la demande chimique en oxygène (DCO), de la demande biochimique en oxygène (DBO) et du total des solides en suspension (TSS). Les DCO, DBO et TSS restant sont ensuite réduits de plus belle par l'unité de réduction de la turbidité et l'étape de polissage final. L'unité de désinfection ajoute un agent oxydant résiduel permettant l'entreposage sécuritaire des eaux grises traitées avant qu'elles soient employées pour tirer la chasse ou pour la lessive. La présence de produits

nettoyants ou de produits d'hygiène de beauté dans les eaux grises n'a aucune incidence sur la performance du traitement.

Le système de traitement des eaux grises produit tous les éléments requis pour les traitements sur place et peut être mis en marche ou à l'arrêt, ce qui est pratique pour les utilisations nordiques et intermittentes. Le système nécessite peu d'entretien ; selon l'utilisation qui en est faite, les électrodes d'EC doivent être remplacés environ tous les trois mois (une procédure de 15 minutes) et les unités de polissage et de désinfection doivent être rafraîchies plusieurs fois par année. Le système automatisé fonctionne sans opérateur et il se lance et s'arrête automatiquement, selon la quantité d'eaux grises présentes. Le système peut également être surveillé à distance et être programmé pour fonctionner pendant des périodes de temps déterminée.

## Installation du système de traitement des eaux grises

Au cours d'une visite initiale en juillet 2017, il a été conclu que la salle mécanique du triplex était trop petite pour y installer le système de traitement des eaux grises. La visite du site a également permis de relever un autre problème touchant le projet-pilote : les eaux grises des douches et l'effluent des toilettes (des eaux noires) étaient confondues dans la tuyauterie de salle de bain sortant de toutes les salles de bain du triplex. La présence d'une quelconque quantité d'eaux noires dans les eaux grises signifie que la totalité de l'écoulement devient de l'eau noire et ne peut plus être traité comme des eaux grises. En raison du pergélisol, les immeubles nordiques sont généralement construits sur pilotis, ce qui peut rendre la récupération distincte des eaux grises et des eaux noires difficile puisqu'il n'est pas possible d'avoir accès à la tuyauterie dans un sous-sol.

Après avoir examiné diverses options, le système de traitement des eaux grises a été installé dans la buanderie du deuxième étage d'une des résidences du triplex, pour traiter les eaux grises de la lessive, de la douche et du bain d'une seule résidence plutôt que de l'ensemble du triplex. Les eaux grises de la lessive sont généralement faciles à récolter, puisque la machine à laver pompe directement les eaux grises dans un réservoir au-dessus du sol. Pour recueillir les eaux grises de la douche et du bain, un appareil novateur<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Une demande de protection conférée par un brevet a été déposée pour cet appareil. Par conséquent, aucun détail supplémentaire à propos de l'appareil n'est présenté ici.

a été développé, qui s'introduit dans le drain du bain afin d'éviter de devoir accéder à la tuyauterie sous le plancher de céramique. Afin de distribuer la charge au deuxième étage, l'armoire du système de contrôle a été installée dans la buanderie, et l'ensemble des réservoirs de récupération empilés pour les eaux grises non traitées et traitées ont été installés dans la salle de bain. Chaque réservoir de récupération possède une capacité de stockage de 100 litres et a été conçu pour déborder dans le drain du bain. Un réservoir d'eau commercial (WaterLoo, 2018) servant de cuve aux eaux grises traitées a été installé sous le couvercle du réservoir de la toilette. La buanderie, adjacente à la salle de bain, possédait un espace de rangement (Figure 3) de taille parfaite pour y installer le système de traitement des eaux grises.

Les eaux grises de la laveuse et de la douche/bain sont recueillies dans le réservoir d'eaux grises non traitées. Les eaux grises traitées étaient désinfectées dans le réservoir de récupération à l'aide d'une approche électrochimique (sans produit chimique). Les eaux grises traitées ont été utilisées pour tirer la chasse de la toilette. L'eau potable est demeurée connectée à la toilette pour les cas où il n'y aurait pas suffisamment d'eaux grises traitées pour tirer la chasse. Le système de contrôle du débit du réservoir de la toilette prévoit une coupure anti-retour entre l'eau potable et les eaux grises dans le réservoir de toilette, conformément aux exigences des divers règlements relatifs à la plomberie. La figure 4 présente les diverses composantes de l'installation du traitement des eaux usées et de leur réemploi. Toutes les modifications mineures de plomberie et d'électricité ont été réalisées professionnellement par un entrepreneur local (Jago Services Inc.).

## Analyse de traitement des eaux grises

Pour le traitement des eaux grises décentralisé, voir la norme NSF/ANSI 350 : *Onsite Residential and Commercial Water Reuse Treatment*, qui prévoit les critères requis pour les systèmes de réemploi de l'eau. Cette norme a désormais été adoptée par les codes internationaux de plomberie et du bâtiment et a été utilisée pour évaluer la performance du système de traitement des eaux grises. Les exigences de traitement



Figure 3 : Buanderie et disposition de la salle de bain dans la résidence du triplex.

pour l'usage résidentiel ( $\leq 5\,678$  l/jour) et commercial ( $> 5\,678$  l/jour) sont présentées au tableau 1.

Des échantillons d'eau potable (du robinet) du triplex, d'eaux grises non traitées et d'eaux grises traitées ont été recueillis et classifiés. L'eau de source provenant du lac près de Cambridge Bay, utilisée pour générer l'eau potable du hameau, a également été échantillonnée et classifiée. La qualité de l'eau potable était une question pertinente puisqu'elle sert de base à laquelle les détergents, savons, shampoings, produits d'hygiène personnelle, huiles et saletés sont ajoutés par les activités des résidents du triplex. Cette combinaison crée les eaux grises à traiter. Puisque les services du laboratoire local pour l'analyse des échantillons n'étaient pas disponibles, des appareils d'analyse ont été achetés et acheminés à la SCREA. Les appareils ont été installés temporairement (Figure 5) dans le bâtiment

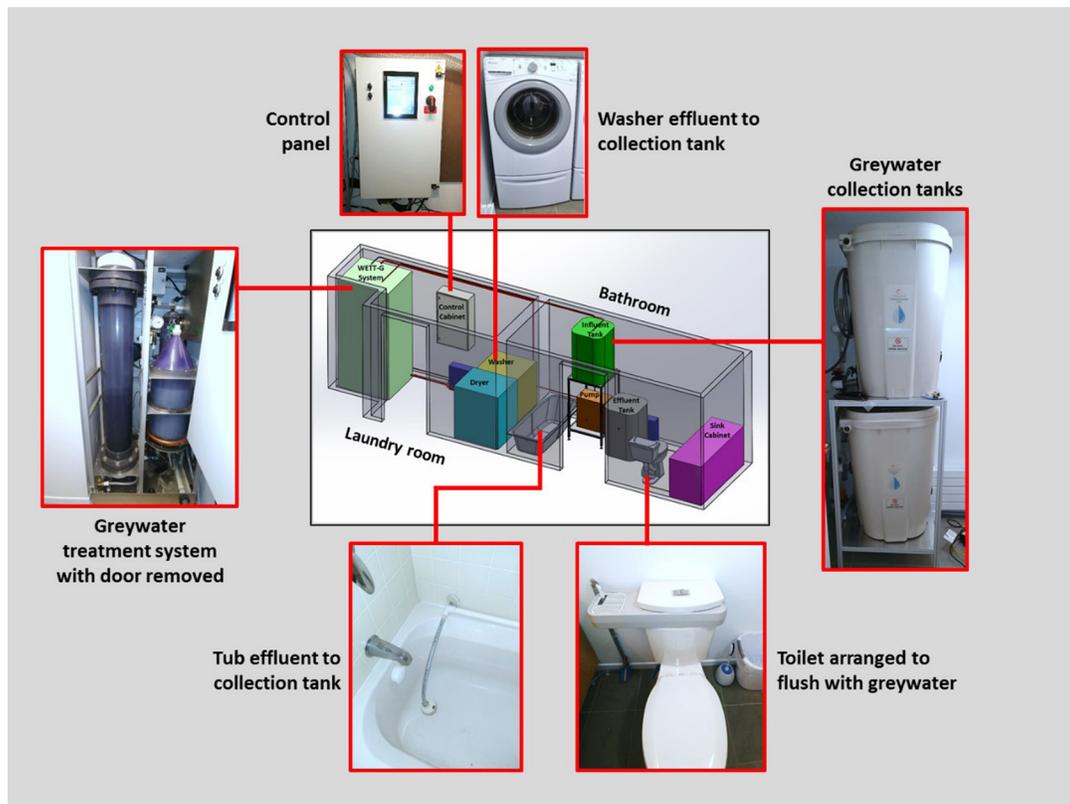


Figure 4 : Traitement des eaux grises et composantes du système de réemploi et leurs emplacements dans la buanderie et la salle de bain.

de recherche sur le terrain et d'entretien (BRE) de la SCREA, puisque le bâtiment de recherche principal (BRP) n'était pas encore officiellement ouvert. Les appareils d'analyse ont été choisis en fonction de leur facilité d'utilisation, de leur portabilité et de l'utilisation de réactifs écologiques qui ne créent pas de matériaux dangereux après la réalisation des tests. Les appareils comprenaient :

- un Mantech PeCOD analyzer pour mesurer la DOC;
- un VELP 6 Position System and Incubator pour la DBO;
- un turbidimètre Hach 2100Q pour mesurer les particules en suspension; et
- un Assy SL1000 Parallel Portable Analyzer pour mesurer le pH, la conductivité, la dureté et le chlore.

En raison de problèmes de connexion électrique, l'appareil VELP ne pouvait pas être utilisé dans le BRE, par conséquent, aucune mesure de la DBO n'a été réalisée. En général, les taux de DCO et de DBO varient entre 2 et 3 ; une valeur de 2,5 a donc été utilisée pour

estimer la DBO, en fonction des résultats obtenus par le passé par les auteurs au cours d'autres projets sur les eaux grises.

Le PeCOD Analyzer a été choisi pour ses capacités uniques et sa pertinence pour ce projet. Comparativement à un appareil de mesure de DCO classique, le PeCOD n'a pas besoin de dichromate de potassium ni de mercure, qui ne peuvent pas être transportés par avion et génèrent des déchets dangereux. À la différence des appareils de mesure de DCO classiques, dont l'analyse prend deux heures et qui sont essentiellement utilisés pour les eaux usées contaminées, le PeCOD Analyzer n'a besoin que de 10 minutes pour réaliser chaque mesure et peut être utilisé avec de l'eau potable (ou d'autres sources relativement propres, comme les eaux grises traitées). Le PeCOD peut également mesurer de faibles niveaux de matière organique naturelle, qui est une variable essentielle du traitement de l'eau potable, spécialement dans les communautés nordiques, et offre une limite de détection de la DCO de 0,7 milligramme par litre (mg/l).

Tableau 1 : Exigences NSF/ANSI 350 pour le traitement des eaux grises pour le réemploi résidentiel (classe R) et commercial (classe C).

Paramètre	Unités	Classe R		Classe C	
		Moyenne générale du test	Échantillon unique maximum	Moyenne générale du test	Echantillon unique maximum
CBOD <sup>5</sup>	(mg/L)	10	25	10	25
TSS	(mg/L)	10	30	10	30
Turbidité	(NTU)	5	10	2	5
E.coli <sup>2</sup>	(MPN/100 mL)	14	240	2.2	200
pH	(SU)	6 - 9	NA <sup>1</sup>	6 - 9	NA
Désinfection des cuves de stockage	(mg/L) <sup>3</sup>	≥0.5 - ≤2.5	NA	≥0.5 - ≤2.5	NA
Couleur		MR <sup>4</sup>	NA	MR	NA
Odeur		Non offensif	NA	Non offensif	NA
Film et mousse huileux		Non détectable	Non détectable	Non détectable	Non détectable
Consommation d'énergie		MR	NA	MR	NA

<sup>1</sup>NA = Sans objet<sup>2</sup>Calculée comme moyenne géométrique<sup>3</sup>Comme le chlore. D'autres désinfectants peuvent être utilisés.<sup>4</sup>MR = Mesuré et rapporté uniquement<sup>5</sup>CBOD = Demande biochimique en oxygène du carbone (mg/L)

## Performance du traitement des eaux grises

Les résultats de l'évaluation démontrent que le système de traitement des eaux grises respecte la norme NSF/ANSI 350 pour le réemploi des eaux grises présentée au tableau 1. La figure 6 présente les résultats obtenus, selon divers paramètres (pH, conductivité, dureté, DCO, turbidité et quantité totale de chlore) pendant le projet-pilote. Les résultats sont regroupés en quatre ensembles de données, chacun comprenant les valeurs pour les eaux grises non traitées et traitées. L'ensemble 1 d'eaux grises est composé d'eau de lessive et d'eau potable à laquelle du détergent et du shampoing ont été ajoutés. Les ensembles 2 et 3 d'eaux grises comprennent un nombre équivalent de brassées de lessive et de douches prises. L'ensemble 4 d'eaux grises compte deux fois plus de brassées de lessive que de douches prises. On peut constater que c'est cet ensemble qui contient les eaux grises les plus concentrées en fonction de la DCO. Les ensembles 1 et 4 comprennent également des données pour l'eau potable de la résidence du triplex.

Tous les échantillons d'eau avaient un pH légèrement basique et une conductivité variant entre 0,2 millisiemens par centimètre (mS/cm) et 1,5 mS/cm. Les eaux grises non traitées affichaient les valeurs de pH et de conductivité les plus élevées (Figure 6a et 6b). Bien que les valeurs de dureté catégorisent l'eau potable et les eaux grises non traitées comme de l'eau dure, le traitement des eaux grises a été efficace pour diminuer significativement la dureté (Figure 6c).

En ce qui a trait à la DCO (Figure 6d), des quantités non négligeables (jusqu'à 25 parties par million (ppm)) de matière oxydable se retrouvaient dans les échantillons d'eau potable recueillis. Ceci indique la présence de contaminants qui n'ont pas été retirés par l'usine de traitement des eaux usées (ou qui ont été introduits dans le réseau d'aqueduc). L'eau de surface utilisée pour rendre l'eau potable avait des valeurs de DCO semblables (données non montrées). On présume que la DCO est principalement due à la matière organique naturelle non retirée pendant le processus de traitement des eaux usées. Il s'agit de



Figure 5 : Appareils d'analyse installés temporairement dans le bâtiment de recherche sur le terrain et d'entretien (BRE) de la SCREA.

niveaux très élevés de DCO pour de l'eau potable, qui devrait idéalement n'avoir aucune DCO ou une quantité négligeable, et indique que les valeurs de DBO (en fonction d'un rapport de DCO/DBO de 2,5) sont proches des exigences de traitement indiquées au tableau 1, même avant que l'eau potable soit utilisée pour la douche ou la lessive et devienne des eaux grises non traitées. Les valeurs de DCO pour les échantillons d'eaux grises non traitées varient entre 126 ppm et 207 ppm (selon le rapport entre l'eau de douche et l'eau de lavage, l'eau de lavage ayant un plus grand apport en DCO). Après traitement, les valeurs de DCO ont été réduites à une fourchette allant de 0,86 ppm à 22 ppm, avec une moyenne de 10 ppm. Les valeurs de DCO des eaux grises traitées correspondent à des valeurs de DBO variant de 0,34 ppm à 8,8 ppm, avec une moyenne de 4,3 ppm. Pour ce qui est de la DCO, les eaux grises traitées étaient aussi pures, sinon plus pures, que l'eau potable à la disposition des résidents du triplex.

La turbidité (Figure 6e) de l'eau potable était négligeable. La turbidité des eaux grises non traitées se situait entre 13,5 unités de turbidité néphélométrique (uTN) et 152 uTN. Elle a été réduite au-dessous de 2 uTN pour tous les effluents d'eaux grises traitées. Les mesures de chlore (Figure 6f) indiquaient un résidu de chlore très léger (<0,05 ppm) dans l'eau potable (bien qu'aucun résidu n'a été détecté dans les échantillons prélevés au cours des visites précédentes) et dans les échantillons d'eaux grises non traitées (entre 0,04 ppm et 0,09 ppm). L'eau potable contient généralement des résidus de chlore variant de 1 à 2 ppm pour prévenir la contamination. Les eaux grises traitées contenaient entre 0,3 et 0,75 ppm de résidu de chlore, ce qui est idéal. Un résidu de chlore indique qu'il y avait suffisamment de chlore pour inactiver les bactéries et certains virus causant des maladies, et que l'eau est protégée de la recontamination pendant son stockage.

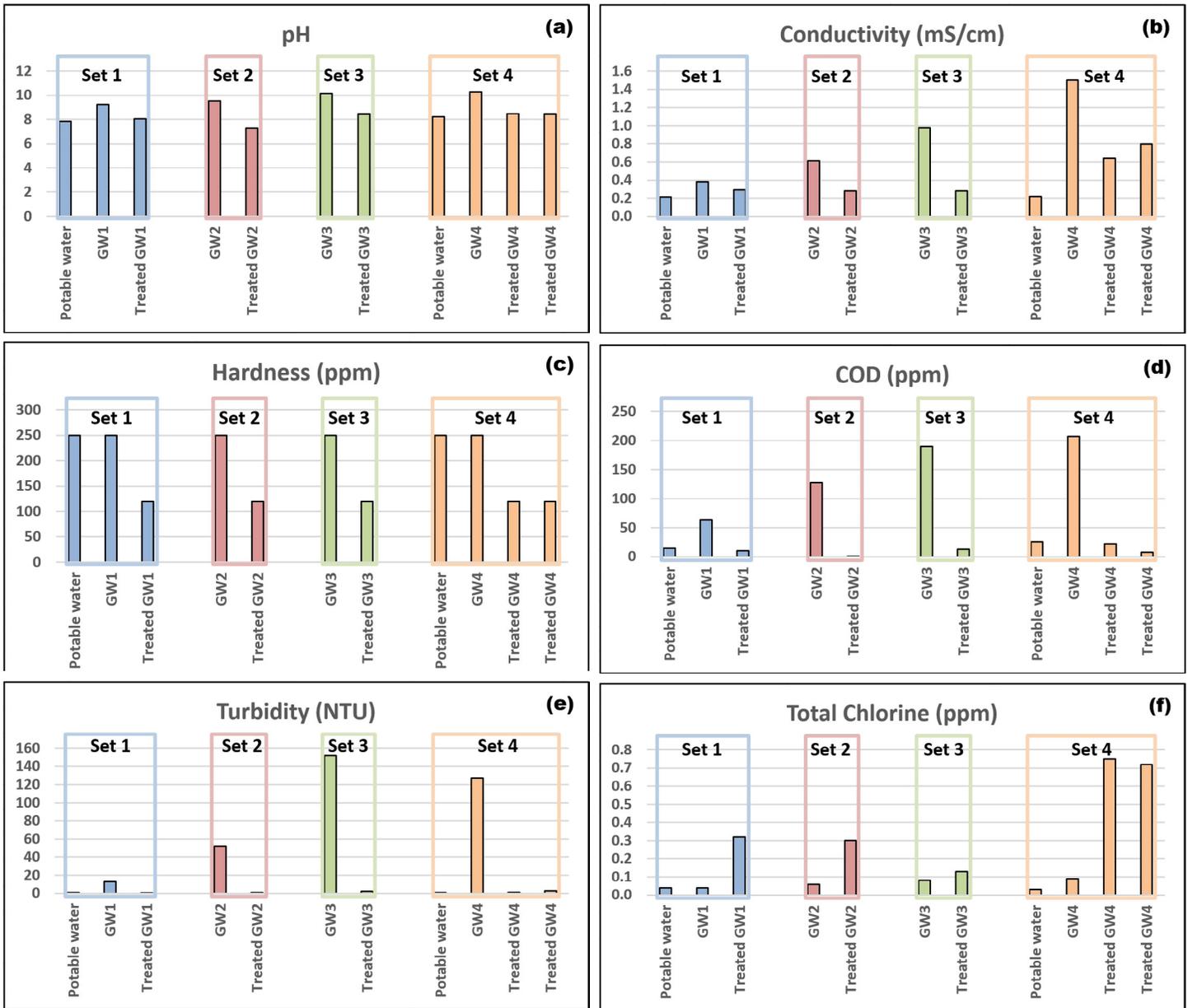


Figure 6 : Analyse des résultats a) du pH, b) de la conductivité, c) de la dureté, d) de la DCO, e) de la turbidité et f) du chlore total.

La figure 7 montre une photo d'eaux grises non traitées et traitées. On peut noter l'amélioration importante de la qualité de l'eau.

Le réservoir de toilette de la résidence du triplex a été nettoyé de tous les dépôts et biofilms et les eaux grises traitées ont été utilisées pour tirer la chasse de la toilette. Les eaux grises traitées n'avaient aucune incidence sur le réservoir de la toilette ou le mécanisme de chasse ; l'eau du réservoir était claire et aucun dépôt n'a été observé (Figure 8). Cette situation était attendue puisque des travaux antérieurs (Poirier et Pristavita, 2017) ont démontré qu'une toilette dont la chasse a été tirée pour une période allant jusqu'à six mois avec

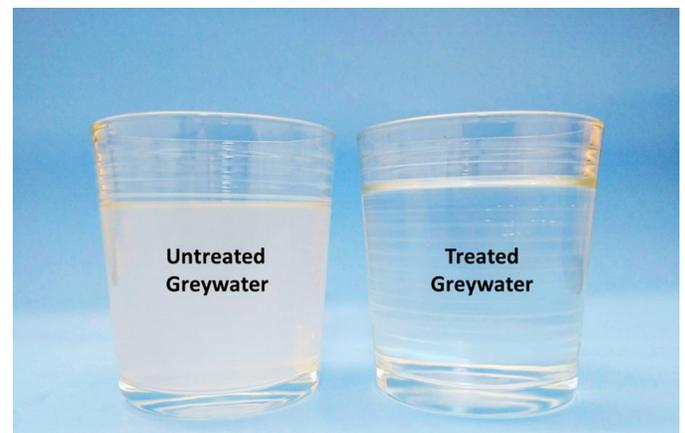


Figure 7 : Échantillons d'eaux grises traitées et non traitées obtenus pendant le projet-pilote.



Figure 8 : Réservoir de toilette avant (gauche) et après (droite) avoir été nettoyé et tiré la chasse d'eau avec les eaux grises traitées.

les eaux grises désinfectées produites par le système de traitement des eaux grises n'avait développé aucun biofilm ni dépôt.

## Économies réalisées par le traitement des eaux grises dans un cadre d'utilisations nordiques

Puisque le système de traitement des eaux grises est électrochimique, la conductivité des eaux grises a une

incidence sur la consommation d'électricité. En utilisant une valeur moyenne de  $1 \text{ m}^{\text{S}}/\text{cm}$  pour la conductivité des eaux grises, conformément aux mesures prises pendant le projet-pilote, la consommation d'énergie du système de traitement était de 0,5 kilowatt (kW). Le coût moyen de l'électricité au Canada est de 0,129 \$/kWh par heure (Office national de l'énergie du gouvernement du Canada, 2017). Le gouvernement du Nunavut subventionne l'électricité pour les résidents d'unités d'habitation privées, y compris pour les propriétaires, et pour les petites entreprises ayant un produit brut de moins de deux millions de dollars par année. Le taux de subvention est d'un peu plus de 0,30 \$/kWh ; les locataires de logements sociaux paient pour leur part un taux largement subventionné de seulement 0,06 \$/kWh (Nunatsiaq News, 2018).

En fonction des résultats obtenus, le système de traitement produit des eaux grises traitées au coût de 6,80 \$/m<sup>3</sup>, à un taux d'électricité subventionné de 0,32 \$/kWh. L'électricité et les électrodes fusibles représentent chacun environ 40 % du coût des eaux grises traitées. Ces coûts se comparent avantageusement au coût de l'eau non subventionnée de Cambridge Bay (taux économique de 75 \$/m<sup>3</sup>) et au coût de l'eau subventionnée pour les clients commerciaux (23 \$/m<sup>3</sup>), et sont comparables au coût de l'eau grandement subventionné des clients non commerciaux (6 \$/m<sup>3</sup>) (hameau de Cambridge Bay, NU, s.d.). En supposant qu'environ 50 % de la consommation d'eau dans les établissements résidentiels nordique est dédié aux douches/bains/lessive, le traitement et le réemploi des eaux grises entraîneraient une économie de 35 % des coûts d'exploitation pour les clients commerciaux si la totalité des eaux grises pouvait être utilisée pour tirer la chasse d'eau et pour la lessive. Subsidairement, un système de traitement des eaux grises pourrait également entraîner une diminution de l'incidence environnementale en plus d'autres avantages grâce à la diminution des eaux usées produites. Cela pourrait permettre aux utilisateurs d'augmenter efficacement la quantité d'eau disponible par personne en réservant leur attribution d'eau potable aux activités pour lesquelles elle est nécessaire (préparation de la nourriture, consommation, douche ou bain) et en utilisant les eaux grises traitées pour tirer la chasse des toilettes et faire la lessive. Ces aspects peuvent avoir une plus grande importance que l'épargne mensuelle sur les coûts d'eau pour les régions nordiques ou lorsque l'eau est rare. Il est difficile d'attribuer une valeur à ces aspects.

Des études tentent fréquemment d'évaluer la période de recouvrement des systèmes de traitement des eaux grises en fonction des économies réalisées, même si ces économies ne sont pas les seuls avantages qui en sont tirés. Ce type d'analyse démontre généralement que pour les systèmes offrant un niveau élevé de traitement et étant en mesure de respecter les normes des codes de plomberie et du bâtiment, les périodes de recouvrement sont longues (plusieurs années) pour les immeubles individuels, mais qu'elles peuvent être plus raisonnables pour les immeubles à logements multiples. Cette situation est due au fait que le coût de l'investissement par m<sup>3</sup> des eaux grises traitées diminue significativement lorsque la capacité de traitement augmente. Dans les régions nordiques, en raison du coût très élevé de l'eau, la période de recouvrement est réduite et l'évaluation doit être faite au cas par cas. Une approche beaucoup plus simple et abordable du réemploi des eaux grises est en cour de développement pour les maisons unifamiliales nordiques dont l'espace est restreint et qui ont besoin d'un recouvrement rapide. Une approche subsidiaire au système de traitement des eaux grises pour les immeubles à logements multiples sera décrite dans une publication à venir.

## Considérations d'ordre communautaire

Une enquête détaillée a été préparée pour recueillir des renseignements sur les résidents du nord à propos de leur satisfaction concernant la qualité et la quantité de l'eau potable disponible, ainsi que de leur compréhension du traitement et du réemploi des eaux grises et de leur point de vue à ce sujet. Cette enquête a été menée de façon anonyme afin de cerner les irritants existants par rapport à l'eau et d'évaluer l'acceptabilité du traitement et du réemploi des eaux grises. Seulement une partie des résultats obtenus sont présentés ici. Les répondants à l'enquête ne constituent pas un sous-groupe représentatif de la communauté, puisqu'il s'agit plutôt de personnes qui souhaitent y participer ou qui étaient disponibles pour le faire. Les 20 répondants résidaient à Cambridge Bay. 85 % de ceux-ci possédaient une scolarité collégiale ou universitaire, 80 % étaient des femmes, 75 % étaient des Inuits, 50 % étaient âgés de 18 à 29 ans, 25 % étaient âgés de 30 à 49 ans et 25 % étaient âgés de 50 ans et plus. En ce qui a trait à l'occupation, 25 % étaient employés, 65 % étaient étudiants et 10 % étaient propriétaires d'entreprise. Relativement au type d'habitation, 45 % des répondants vivaient dans

des immeubles à logements multiples, 40 % vivaient dans des maisons unifamiliales et 15 % vivaient en appartement ou en condo. La livraison d'eau potable par camion a lieu de trois à quatre fois par semaine pour 65 % des répondants.

En général, les répondants sont d'avis que le coût de l'eau est acceptable (70 %) ; plusieurs d'entre eux (60 %) ne savaient pas que le gouvernement du Nunavut subventionne le coût de l'eau, ou n'en étaient pas certains. Relativement aux eaux grises, 65 % des répondants connaissaient ce type d'eau et 65 % seraient prêt à réemployer les eaux grises. Il a été demandé aux répondants quelles raisons les motiveraient à réemployer les eaux grises. Les deux principales raisons nommées sont l'accès à plus d'eau potable et des raisons environnementales. Certains répondants étaient toutefois inquiets quant à la sécurité de cette pratique (40 %), du fait qu'elle nécessiterait trop d'espace (15 %), qu'elle serait compliquée et onéreuse (25 %) ou étaient incertains quant à la façon de procéder (15 %). Cette enquête indique que les répondants sont ouverts à la possibilité d'utiliser les eaux grises traitées pour en tirer divers avantages.

## Conclusions

Un système électrochimique de traitement des eaux grises automatisé qui ne nécessite aucun ajout de produit chimique et dont les composantes ne demandent pas d'entretien important a été installé dans un immeuble à logements multiples nordique (un triplex situé à la SCREA, à Cambridge Bay, au Nunavut). Nous avons découvert que les valeurs en DCO de l'eau potable locale étaient élevées (jusqu'à 25 ppm), même avant qu'elle ne soit transformée en eaux grises par son utilisation pour la lessive ou le bain (toutefois, le niveau de turbidité était négligeable). Il a été présumé que cette DCO était liée aux matières organiques naturelles retrouvées dans l'eau de lac utilisée pour rendre l'eau potable, puisque les valeurs en DCO de l'eau du lac étaient semblables. Le système de traitement des eaux grises a été en mesure de produire des eaux grises traitées ayant des valeurs de DCO plus basses que celles de l'eau potable, et ce, même si les matières organiques naturelles sont difficiles à retirer. Les paramètres des eaux grises traitées respectaient les niveaux exigés retrouvés dans la norme NSF/ANSI 350 et les eaux grises traitées ont été produites à un coût beaucoup plus bas que le coût de l'eau non subventionnée et

de l'eau subventionnée des clients commerciaux de Cambridge Bay. Ce système de traitement des eaux grises pourrait être intéressant pour les entreprises comme les hôtels et les auberges, les immeubles à logements multiples et le gouvernement du Nunavut, qui injecte de vastes sommes en subventions afin que les clients puissent avoir accès à de l'eau à prix abordable. Le traitement et le réemploi des eaux grises peuvent également entraîner une réduction du rejet des eaux usées et une augmentation de la disponibilité de l'eau potable par personne. Une enquête détaillée menée auprès de résidents locaux et de propriétaire d'entreprise a démontré que les répondants étaient ouverts à la possibilité d'utiliser les eaux grises traitées pour en tirer divers avantages.

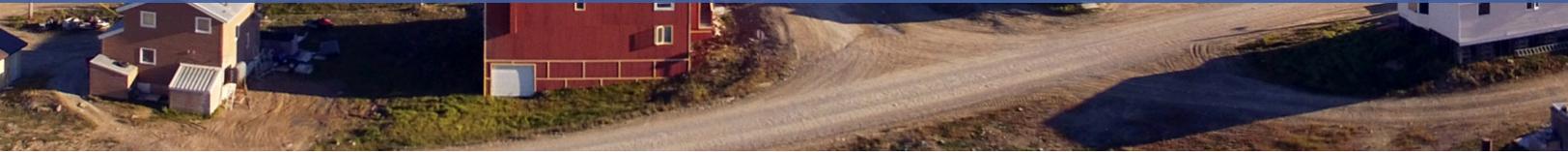
## Remerciements

*Terragon, technologies de l'environnement inc. est une société de technologie propre primée fondée en 2004 et située à Montréal, au Québec. Terragon développe des appareils simples destinés aux déchets solides, aux eaux usées et aux boues d'épuration qui permettent à tous les habitats de traiter leurs déchets localement, sans dommage environnemental, et avec d'importants bénéfices pour la récupération de ressources précieuses.* Nous remercions chaleureusement Savoir polaire qui, par sa contribution financière, a permis la réalisation de ce projet. Nous remercions également Walter Linares, pour son aide dans la construction et l'installation du système de traitement des eaux grises (Terragon, technologies de l'environnement – ingénieur), Leanne Beaulieu, pour avoir réalisé la plupart des enquêtes (Nunavut Arctic College – Kitikmeot Campus – Environmental Program Student) et Nandana Prasad, pour son aide (Nunavut Arctic College – Kitikmeot Campus – Coordinator for Community Programs).

## Références

- Daley, K., Castleden, H., Jamieson, R., Furgal, C., Ell, N. 2014. Municipal water quantities and health in Nunavut households: An exploratory case study in Coral Harbour, Nunavut, Canada. *International Journal of Circumpolar Health*, 73:23843. doi:10.3402/ijch.v73.23843. Retrieved from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3970036/> [accessed February 26, 2019].
- Government of Canada National Energy Board. 2017. Market Snapshot: Explaining the high cost of power in northern Canada. 16 February 2017. Retrieved from: <https://www.neb-one.gc.ca/nrg/ntgrtd/mrkt/snpsht/2017/02-03hghcstpwr-eng.html?=&wbdisable=true> [accessed February 2019].
- Hamlet of Cambridge Bay, NU. No date. By-law No. 232–Schedule A: Water and sewer rates for municipal services. 24 pp. Retrieved from: <http://www.cambridgebay.ca/sites/default/files/By-Law%20232%20-%20Water%20Sewer.pdf> [accessed February 26, 2019].
- Nunatsiaq News. 2018. Nunavut cabinet rejects uniform power rates, grants QEC 6.6% hike over two years. 2 June 2018. Retrieved from: [https://nunatsiaq.com/stories/article/65674nunavut\\_cabinet\\_rejects\\_uniform\\_power\\_rates\\_grants\\_qec\\_6-6\\_hike\\_over\\_t/](https://nunatsiaq.com/stories/article/65674nunavut_cabinet_rejects_uniform_power_rates_grants_qec_6-6_hike_over_t/) [accessed February 26, 2019].
- Poirier, N.A., Pristavita, R. 2017. Achieving benefits through greywater treatment and reuse in northern buildings and communities. *Polar Knowledge: Aqhaliat* 2018, Polar Knowledge Canada, p. 131–137. Doi:10.53298/pkc.2018.16. Retrieved from: <https://www.canada.ca/content/dam/polar-polaire/documents/pdf/aqhaliat/Aqhaliat-2018-16-Poirier-et-al.pdf> [accessed February 26, 2019].
- Statistics Canada. 2016. Census profile, 2016 census, Cambridge Bay [population centre], Nunavut and Nunavut [Territory]. Retrieved from: <https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2016/dp-pd/prof/details/page>.
- WaterLoo. 2018. Smart greywater storage bank. Retrieved from: <https://mywaterloo.co.za/the-product/> [accessed August 22, 2019].
- Mortillaro, N. 2016. This is how much water Canadians waste. Retrieved from [https://globalnews.ca/news/3016754/this-is-how-much-water-canadians-waste/?utm\\_expid=kz0UD5JkQOC6yMqxGqECg.0&utm\\_referrer](https://globalnews.ca/news/3016754/this-is-how-much-water-canadians-waste/?utm_expid=kz0UD5JkQOC6yMqxGqECg.0&utm_referrer) [accessed August 26, 2019].

# RENDEMENT D'UN SYSTÈME BIBLOC DE VENTILATION PAR RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE POUR UNE UTILISATION DANS DES HABITATIONS ARCTIQUES



**B. Ouazia<sup>1\*</sup>, G. Gnanamurugan<sup>1</sup>, C. Arsenault<sup>1</sup>, Y. Li<sup>1</sup>, M. Brown<sup>2</sup>, G. Kolsteren<sup>2</sup>, C. Chisholm<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Conseil national de recherches du Canada, Ottawa, Ontario, Canada

<sup>2</sup> Savoir polaire Canada, Station canadienne de recherche dans l'Extrême-Arctique, Cambridge Bay, Nunavut, Canada

\* [Boualem.ouazia@nrc-cnrc.gc.ca](mailto:Boualem.ouazia@nrc-cnrc.gc.ca)

## Résumé

Les extrêmes du climat arctique posent de grandes difficultés pour le chauffage domestique et les systèmes de ventilation. Les systèmes de ventilateurs récupérateurs de chaleur/d'énergie (VRC/VRÉ) sont des types de systèmes de chauffage, ventilation et conditionnement d'air (CVCA) qui peuvent offrir les taux de ventilation requis, tout en réduisant la consommation d'énergie. Le rendement des systèmes VRC/VRÉ et CVCA s'est avéré inadéquat dans les climats froids en raison de défaillance des appareils (givrage, etc.). Les appareils traditionnels de VRC/VRÉ emploient une protection contre le givre (préchauffage) ou des stratégies de dégivrage (reprise d'air de l'air vicié, etc.) qui peuvent empêcher d'atteindre le taux de ventilation requis et diminuer les économies d'énergies potentielles offertes par les systèmes VRC/VRÉ. Un appareil bibloc, conçu avec deux échangeurs d'air parallèles et un registre de réglage, agit contre le givre en dirigeant périodiquement de l'air chaud par l'un des deux noyaux alors que le second noyau réchauffe l'air extérieur. Cet article technique présente les résultats de rendement d'un système bibloc en fonction d'une méthodologie rigoureuse en trois volets. Premièrement, une évaluation en laboratoire a été

réalisée à l'aide de chambres climatiques afin de simuler des conditions intérieures et extérieures déterminées par la norme d'homologation CSA-C439 (Groupe CSA, 2018) et par les conditions usuelles dans l'Arctique. Deuxièmement, des essais côte à côte à l'aide de maisons de recherche jumelles à Ottawa ont permis de comparer le rendement complet d'une maison dotée d'un VRÉ monobloc et d'une maison dotée d'un système de récupération d'énergie bibloc. Troisièmement, une surveillance prolongée de la technologie bibloc a été réalisée à Cambridge Bay (Nunavut) pour démontrer le rendement à long terme et la résilience du système. Il a été démontré que cette technologie est en mesure de soutenir des températures sous les -30 °C sans que son rendement thermique en soit diminué. Ce système s'est également montré plus tolérant au givre et capable de fournir en continu de l'air extérieur à la maison.

## Introduction

Les extrêmes du climat arctique posent de grandes difficultés pour la ventilation domestique et les systèmes de chauffage. La consommation d'énergie et la demande en chauffage des locaux pour les immeubles des

### Références suggérées :

Ouazia, B., Gnanamurugan, G., Arsenault, A., Li, Y., Brown, M., Kolsteren, G., Chisholm, C. 2019. Rendement d'un système bibloc de ventilation par récupération d'énergie pour une utilisation dans des habitations arctiques. *Savoir polaire : Aqhaliat* 2019, *Savoir polaire Canada*, p. 85–94 DOI: 10.35298/pc.2019.08

communautés éloignées sont très élevées. Dans les régions arctiques et nordiques du Canada, la température moyenne pendant l'hiver est de  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  ou moins, alors que plusieurs foyers nordiques sont chauffés à plus de  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ce qui crée une charge importante sur les systèmes de chauffage et de ventilation (Zaloum, 2010). Les immeubles étanches à l'air nécessitent des systèmes de ventilation ayant un bon rendement énergétique pour maintenir une qualité de l'air intérieur (QAI) acceptable, demeurer confortable et protéger l'enveloppe de bâtiment des dommages causés par l'humidité. Sans un apport continu en air frais, les polluants intérieurs ( $\text{CO}_2$ , l'excès d'humidité, etc.) ne sont pas évacués, ce qui peut causer ou aggraver les problèmes de santé et de confort des occupants et potentiellement favoriser la croissance de moisissure. Un système de ventilation mécanique équilibré doté de ventilateurs à récupération de chaleur ou d'énergie (VRC/VRÉ) est un outil idéal pour répondre aux exigences relatives à la ventilation du Code national du bâtiment du Canada retrouvées dans les normes relatives à la ventilation et à la qualité de l'air intérieur ainsi que dans les programmes d'efficacité énergétique.

Les VRC fournissent et évacuent simultanément des quantités d'air équivalentes de la maison, tout en effectuant un transfert de la chaleur sensible entre les deux débits d'air. Le fonctionnement des VRÉ est semblable à celui des VRC, mais en plus de récupérer la chaleur sensible, ils transfèrent la chaleur latente (humidité) entre les débits d'air évacué et d'air soufflé. Les systèmes VRC/VRÉ permettent un échange d'air adéquat sans entraîner de pertes d'énergie excessives. Ce sont des méthodes efficaces et bien connues pour améliorer l'efficacité énergétique et la ventilation des immeubles résidentiels. Toutefois, la ventilation des maisons peut poser problème dans le Nord, où le givre

représente un enjeu de taille pour les échangeurs de chaleur et d'énergie de ces systèmes. La formation de givre dans les échangeurs est commune dans les régions froides où la température extérieure se situe sous les  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . L'air froid extérieur peut refroidir l'air frais extrait bien au-dessous du point de congélation et l'humidité comprise dans l'air évacué peut geler sur les surfaces de l'échangeur de chaleur et créer une couche de givre. Les températures hivernales du Grand Nord sont beaucoup plus froides que les températures tests de  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  généralement utilisées par les fabricants de VRC/VRÉ. La certification à très basse température est un test optionnel pour obtenir l'homologation du Home Ventilating Institute (HVI) (le fabricant peut également choisir de réaliser ce test à toute température extérieure sous  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

À ce jour, le rendement des VRC/VRÉ dans les climats froids et rigoureux est inadéquat (Rafati et al., 2014) en raison :

- de bris d'appareil et de problèmes classiques créés par la formation de givre dans les échangeurs de chaleur (blocage partiel ou total des passages d'air) ;
- d'une augmentation des chutes de pression causées par l'échangeur de chaleur ou d'une diminution du taux de renouvellement d'air ;
- d'une augmentation de l'énergie électrique nécessaire pour faire fonctionner les ventilateurs ;
- d'une diminution du taux de transfert de chaleur entre les deux débits d'air ; et
- de courants d'air froid dans l'espace en raison de la froideur de l'air soufflé.



Chambres atmosphériques  
du laboratoire



CCTR



Triplex de Cambridge Bay,  
NU

Figure 1 : Installations utilisées pour cette étude.

Les appareils classiques VRC/VRÉ sont généralement dotés de systèmes de protection contre le givre, comme le préchauffage de l'air extérieur ou la recirculation de l'air de reprise dans l'échangeur de chaleur avant de le renvoyer vers l'air soufflé dans la maison. Ces stratégies de dégivrage peuvent aller à l'encontre des normes de ventilation (faisant en sorte que le taux d'air échangé n'est pas satisfait) et réduire les économies d'énergie attendues. L'objectif de ce projet est d'étudier un système VRÉ bibloc innovant et ses emplois possibles comme technologie de remplacement conçue pour offrir une ventilation continue et répondre aux préoccupations relatives à la protection contre le givre pour les habitations de l'Arctique.

## Méthode

Les présents travaux de recherche font intervenir une approche en trois volets de la recherche sur le rendement d'un appareil VRÉ bibloc innovant conçu pour les habitations arctiques. Cette méthodologie a débuté par une évaluation en laboratoire à l'aide de deux chambres atmosphériques permettant de simuler les conditions intérieures et extérieures décrites à la figure 1 (photo de gauche). Ensuite, des essais côte à côte à l'aide de maisons de recherche jumelles à Ottawa ont été réalisés afin de comparer le rendement complet entre une maison dotée d'un VRÉ monobloc et une maison dotée d'un appareil VRÉ bibloc. Les maisons jumelles du Centre canadien des technologies résidentielles (CCTR) sont montrées à la figure 1 (photo du centre). Enfin, la technologie bibloc a été déployée dans un triplex situé en Arctique à des fins de surveillance prolongée pour démontrer le rendement à long terme et la résilience du système (montré à la figure 1, photo de droite).

## Description de la technologie

Il s'agit d'un appareil de traitement de l'air bibloc équipé d'un échangeur de chaleur à double noyau cyclique régénératif. Cet échange de chaleur repose sur le stockage et la libération cyclique d'énergie dans les plaques d'acier ondulé exposées à l'air évacué et à l'air soufflé. L'appareil comprend un ventilateur de soufflage et un ventilateur d'évacuation, ainsi que deux plaques d'échange de chaleur qui agissent comme accumulateurs d'énergie. Entre les noyaux se trouve un registre breveté qui dirige périodiquement l'air chaud évacué au travers de l'un des deux noyaux, tandis que les plaques chaudes de l'autre noyau réchauffent

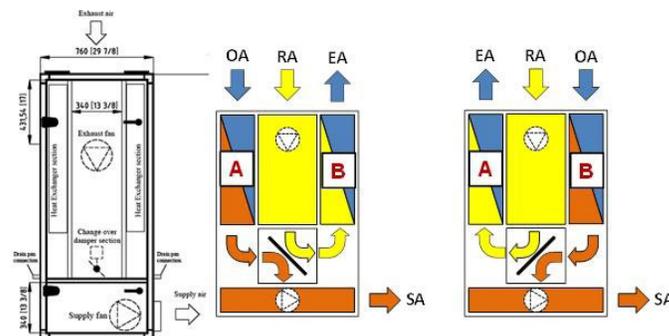


Figure 2 : Principe de fonctionnement – séquence 1 (gauche) et séquence 2 (droite).

l'air extérieur. Le schéma de l'appareil montrant ces deux séquences est présenté à la figure 2. Pendant la *séquence 1*, l'air chaud intérieur évacué charge de chaleur le noyau B, alors que le noyau A transfère sa chaleur à l'air soufflé. Pendant la *séquence 2*, l'air chaud intérieur évacué charge de chaleur le noyau A et le noyau B transfère la chaleur à l'air soufflé.

Le registre est contrôlé par deux thermostats internes, qui assurent un apport d'air confortable en toutes conditions. Le premier thermostat, situé au niveau de l'air soufflé, est réglé à 15 °C tandis que le second thermostat, situé au niveau de l'air évacué, est réglé à 20 °C. La séquence des thermostats est liée à la température de l'air évacué. Si la température est :

- en dessous de 20 °C, l'appareil sera en mode récupération d'énergie (nouveau cycle chaque 60 secondes) ;
- au-dessus de 20 °C, avec une température d'air soufflé supérieure à 15 °C, l'appareil fonctionne en mode de refroidissement naturel (nouveau cycle aux 3 heures) ; et
- au-dessus de 20 °C, avec un air soufflé à moins de 15 °C, l'appareil est en mode de récupération d'énergie jusqu'à ce que l'air soufflé soit supérieur à 15 °C, auquel cas l'appareil se mettra en mode de refroidissement naturel.

## Essais en laboratoire

Les essais en laboratoire ont été réalisés dans une installation expérimentale. Des essais de rendement dans un climat froid ont été réalisés à l'aide des chambres climatiques doubles et d'un banc d'essai de VRC/VRÉ. Le VRC/VRÉ a été installé entre la chambre climatique intérieure et la chambre climatique extérieure, comme le montre la figure 1 (image

de gauche). Les conditions climatiques extérieures peuvent être modulées dans une fourchette allant de  $-40\text{ °C}$  à  $+40\text{ °C}$ ,  $\pm 1,0\text{ °C}$ , et peuvent être maintenues à une température stable. Les conditions climatiques intérieures simulées peuvent également être modulées entre  $20\text{ °C}$  et  $30\text{ °C}$ ,  $\pm 1,0\text{ °C}$ , tout en conservant une température équilibrée et une humidité relative ambiante (de 30 % à 60 %). Plusieurs propriétés ont été mesurées à divers endroits dans l'appareil afin d'établir l'efficacité et de déterminer à quel moment survient le givre dans l'appareil bibloc. Ces mesures comprennent :

- les débits d'air soufflé et évacué à l'aide d'éléments de débit d'air installés dans les conduits de soufflage et d'évacuation ;
- les chutes de pression entre les échangeurs de chaleur A et B à l'aide de capteurs de pression ; et
- la température et l'humidité relative de l'air à l'entrée et à la sortie des débits d'air soufflé et évacué (reprise d'air) à l'aide de sondes d'humidité relative et de température achetées calibrées pour une fourchette de température entre  $-40\text{ °C}$  et  $+40\text{ °C}$  et pour une fourchette d'humidité relative se situant entre 10 % et 90 %.

Une série d'expériences a été réalisée pour recueillir des données sur le comportement thermique et de ventilation. Des données ont également été recueillies sur le rendement d'un appareil VRÉ bibloc soumis à des conditions climatiques intérieures et extérieures stables. Les résultats obtenus de ces expériences ont été utilisés pour évaluer l'efficacité sensible et totale ainsi que l'incidence de l'accumulation possible de givre sur le rendement thermique et le rendement de la ventilation de cette technologie. Les conditions établies dans la chambre intérieure ont été déterminées en fonctions de la norme d'homologation CSA-C439 (groupe CSA, 2018) (présentées au tableau 1, pour les essais 1 à 5) et de conditions intérieures réalistes pour les résidences nordiques (présentées au tableau 1, pour

les essais 6 à 10). Pour tester l'appareil à l'essai dans des températures extérieures extrêmement froides, les conditions de la chambre extérieure ont été modulées de  $0\text{ °C}$  jusqu'à  $-35\text{ °C}$ . Les essais en laboratoire ont été réalisés avec les exigences de ventilation totales des maisons jumelles, calculées en fonction de la norme de ventilation 62.2. de la American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) relative à la qualité acceptable de l'air intérieur (ASHRAE, 2016). Les débits d'air soufflé et évacué équilibrés ont été fixés à  $2,83 \pm 0,14\text{ m}^3/\text{min}$  ( $100 \pm 5\text{ PCM}$ ), conformément à la conception expérimentale présentée au tableau 1.

### Essais côte à côte

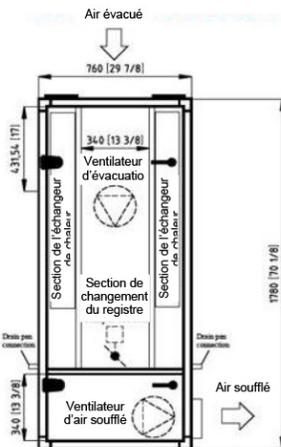
Les maisons de recherche jumelles du CCTR montrées à la figure 3 ont été utilisées pour les essais comparatifs côte à côte (Ouazia et al., 2006). Les essais ont comparé un VRÉ bibloc (installé dans la maison test) à un VRÉ classique monobloc (installé dans la maison de référence). L'installation de recherche des maisons jumelles offre un « système de simulation d'occupation ». Ce système, qui utilise une technologie domotique, simule l'activité humaine en faisant fonctionner les appareils principaux (four, lave-vaisselle, laveuse et sècheuse), lumières, robinets d'eau, ventilateurs et autres appareils simulant des gains de chaleur typiques.

Le calendrier de simulation reprend les activités qui auraient lieu dans une résidence habitée par une famille de deux adultes et deux enfants. La chaleur générée par les humains est simulée par deux ampoules à incandescence de 60 W (deux adultes) et deux ampoules à incandescence de 40 W (deux enfants) situées à divers endroits de la maison. Les maisons de recherche du CCTR sont équipées de systèmes d'acquisition de données (SAD) composés de plus de 250 capteurs et 23 compteurs (de gaz, d'eau et d'électricité). Les SAD saisissent un portrait clair du

Tableau 1 : Conception expérimentale.

Essais	Mode	Conditions intérieures	T [°C] extérieure
1 - 5	Mode de chauffage dans des conditions normales déterminées par la CSA-C439/HVI	22 °C et 40 % humidité relative	0, -10, -20, -30, -35
6 - 10	Mode de chauffage dans des conditions intérieures nordiques déterminées	25 °C et 55 % humidité relative	0, -10, -20, -30, -35

### Appareil bibloc de la maison test



### Maisons jumelles du CCTR



### Appareil monobloc de la maison de référence

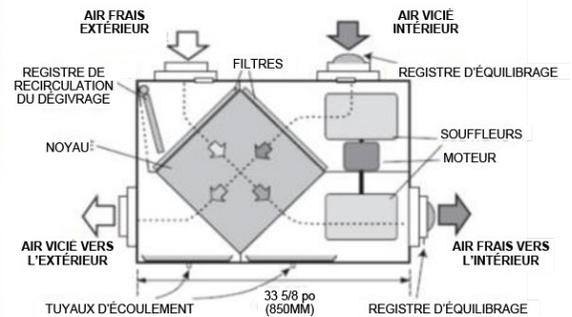


Figure 3 : Essais côte à côte à l'aide des maisons jumelles de recherche du Centre canadien des technologies résidentielles (CCTR).

rendement de la maison en termes de température, d'humidité et de consommation d'énergie. Les essais côte à côte ont nécessité l'installation d'un appareil VRÉ bibloc dans le sous-sol de la maison test. Aucune modification n'a été apportée à la maison de référence, qui était déjà équipée d'un VRÉ monobloc à haute efficacité, initialement installé dans chacune des maisons. Après cette installation, l'appareil bibloc a été programmé pour que ses débits d'air soufflé et évacué correspondent à ceux du VRÉ monobloc. Le rendement des deux maisons côte à côte a été surveillé pendant la saison froide 2017.

### Surveillance en terrain nordique

On retrouve à la figure 4 l'appareil VRÉ bibloc installé dans la salle des machines d'un triplex du campus de

la Station canadienne de recherche dans l'Extrême-Arctique (SCREA) à Cambridge Bay (Nunavut) qui a été surveillé. L'installation de l'appareil et du système d'enregistrement de données dédié a eu lieu en mars 2017, et la surveillance à long terme a été lancée en juin 2017. La surveillance prolongée a capté deux hivers complets : 2017–2018 et 2018–2019.

## Résultats et analyse

### Ventilation

Pendant les essais en laboratoire, les débits d'air soufflé et évacué mesurés n'ont montré aucun signe de contrainte due au gel, que ce soit aux conditions utilisées pour l'obtention de l'homologation CSA-C439 (Groupe CSA, 2018) ou aux conditions décrites par la



Figure 4 : Triplex du campus de la SCREA, appareil bibloc et système d'enregistrement de données dédié déployés.

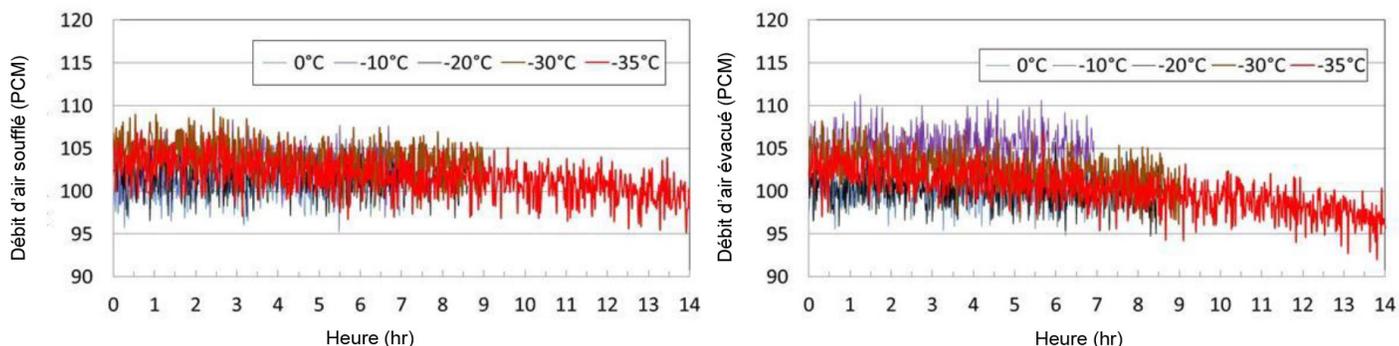


Figure 5 : Débits d'air soufflé (gauche) et évacué (droite) mesurés dans des conditions intérieures nordiques.

Home Ventilating Institute (HVI, 2016). Les résultats des essais dans des conditions intérieures nordiques ont montré une légère baisse des débits d'air soufflé et évacué lorsque la température extérieure se trouvait sous les  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , comme le décrit la figure 5. Cette diminution a été plus prononcée lors de la plus longue période d'essai réalisé à une température extérieure de  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Les essais côte à côte à l'aide des maisons jumelles n'ont montré absolument aucun signe de problèmes de givre sur les VRÉ bibloc (comme montré dans le schéma de droite de la figure 6). Ces essais ont également démontré que le VRÉ bibloc a continué à fournir de l'air extérieur pendant les jours d'essai les plus froids à Ottawa, sans devoir s'arrêter pour dégivrer, contrairement au VRÉ monobloc, qui a dû dégivrer pendant plusieurs heures (comme montré dans le schéma de gauche de la figure 6). Les débits d'air soufflé et évacué sont représentés en rouge dans la figure 6 et la température extérieure est représentée en noir.

Les cycles de dégivrage fréquents du VRÉ monobloc ont causé un apport réduit d'air extérieur dans la maison de référence, ce qui, à son tour, a entraîné une situation où

la maison de référence ne satisfaisait pas aux exigences de ventilation. Il s'agit d'une situation commune des appareils VRC/VRÉ monoblocs installés dans des climats extrêmement froids. Les débits d'air soufflé et évacué mesurés lors de la surveillance prolongée de l'appareil VRÉ bibloc à Cambridge Bay sont montrés à la figure 7.

Le VRÉ bibloc était légèrement déséquilibré et a connu quelques diminutions d'échange d'air. Toutefois, il a généralement été en mesure de supporter une température extérieure aussi basse que  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$  sans que le rendement de sa ventilation en soit affecté (aucune diminution du débit). Il a également été capable de fournir un apport continu d'air extérieur.

### Rendement thermique

L'efficacité sensible apparente ou totale d'un système de récupération de chaleur ou d'énergie est une mesure usuelle du rendement. L'efficacité sensible apparente (ESA) mesure la capacité d'un appareil de VRC/VRÉ à récupérer la chaleur sensible. L'efficacité totale apparente (ETA) mesure la capacité d'un appareil de VRC/VRÉ à récupérer la chaleur totale disponible (chaleur sensible + chaleur latente). L'ETA est calculée

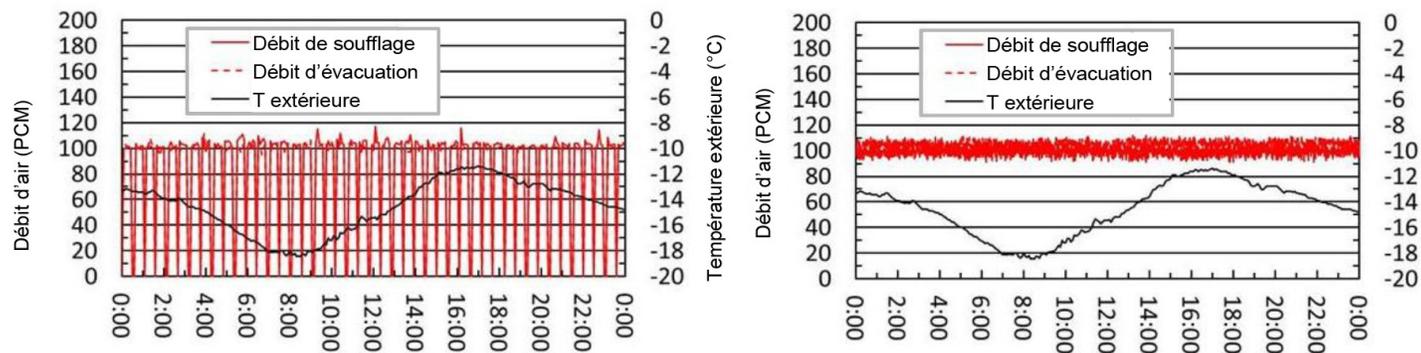


Figure 6 : Débits d'air mesurés lors de l'essai côte à côte dans des conditions extérieures nordiques, maison de référence (gauche) et maison test (droite).

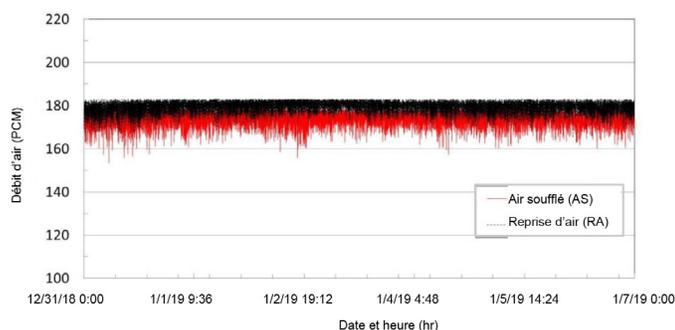
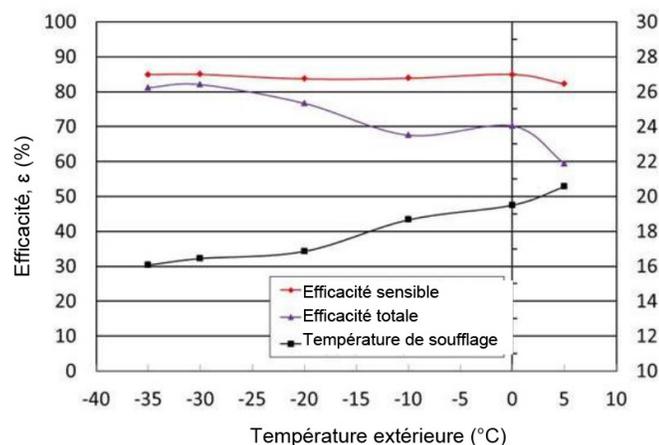


Figure 7 : Débits d'air mesurés pendant la surveillance prolongée à Cambridge Bay (31 décembre 2018 au 6 janvier 2019).

en divisant la chaleur ou l'énergie récupérée (dans le débit d'air soufflé) par la chaleur ou l'énergie totale disponible (différence entre l'intérieur et l'extérieur). L'efficacité ( $\epsilon$ ) du VRÉ bibloc pour le transfert de l'énergie sensible et de l'énergie totale du débit d'air évacué vers le débit d'air soufflé a été calculée pour la fourchette de température décrite au tableau 1, à l'aide de l'équation (1). Où  $M_s$  représente le taux de la masse du débit d'air soufflé,  $M_{min}$  représente le taux de la masse de débit d'air évacué et d'air soufflé minimum et  $X$  représente la température du thermomètre sec ou l'enthalpie à l'entrée de l'air soufflé de l'extérieur, à la sortie de l'air soufflé vers l'intérieur, et l'entrée de l'air évacué de l'intérieur.

$$R_{eco}(T) = R_{ref} e^{E_0 \left( \frac{1}{T_{ref} - T_0} - \frac{1}{T - T_0} \right)}$$



La figure 8 présente le rendement général en termes d'ESA et d'ETA, ainsi que la température de l'air soufflé des essais en laboratoire utilisant les deux chambres climatiques. Ces résultats représentent les conditions intérieures simulées déterminées selon la norme d'homologation CSA-C439 (Groupe CSA, 2018) (schéma de gauche) et les conditions déterminées dans le Nord (schéma de droite).

Les mesures d'ESA calculées lors des essais réalisés avec le VRÉ bibloc dans des conditions d'activités intérieures ciblées par la norme CSA-C439 (Groupe CSA, 2018) variaient entre 82,2 % à 93,6 % (moyenne = 86 %). L'ESA calculée du VRÉ bibloc était beaucoup plus élevée que celle annoncée par les fabricants des appareils VRC/VRÉ monoblocs classiques. Cette situation peut être attribuable à l'échangeur de chaleur à noyau régénérateur cyclique et aux plaques épaisses d'aluminium des échangeurs de chaleur, qui agissent comme des accumulateurs de chaleur. Les valeurs augmentaient lorsque la température extérieure baissait et étaient plus près des valeurs calculées d'ESA lorsque la température extérieure était sous les -20 °C. Les mesures d'ESA calculées pour un VRÉ monobloc dans les mêmes conditions d'activités intérieures ciblées par la norme CSA-C439 (Groupe CSA, 2018) variaient entre 59,4 % et 88,1 %. Les appareils VRÉ monoblocs classiques ne sont pas certifiés pour des températures sous -25 °C. Il est fréquent que leur ETA calculée tombe sous les 70 % lorsque la température extérieure est sous le point de congélation.

Les résultats d'ESA et d'ETA obtenus lors des essais côte à côte du CCTR pour le VRÉ monobloc et le VRÉ bibloc sont présentés à la figure 9. L'ESA calculée pour

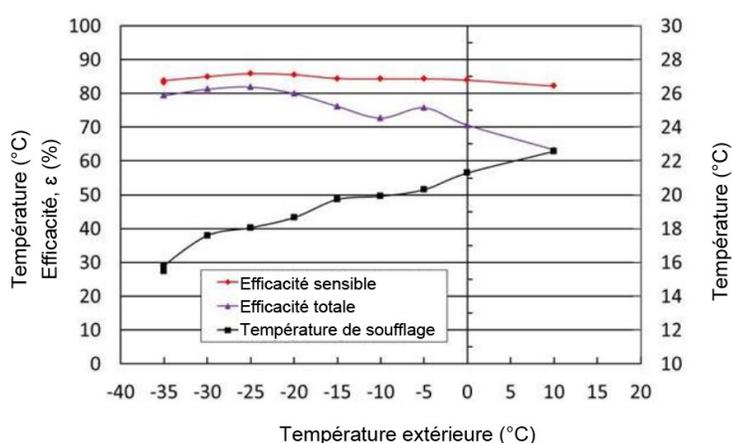


Figure 8 : Le VRÉ bibloc désigne l'ESA, l'ETA, et la température de l'air soufflé dans des conditions conformes à la norme CSA-C439 (gauche) et dans des conditions nordiques (droite).

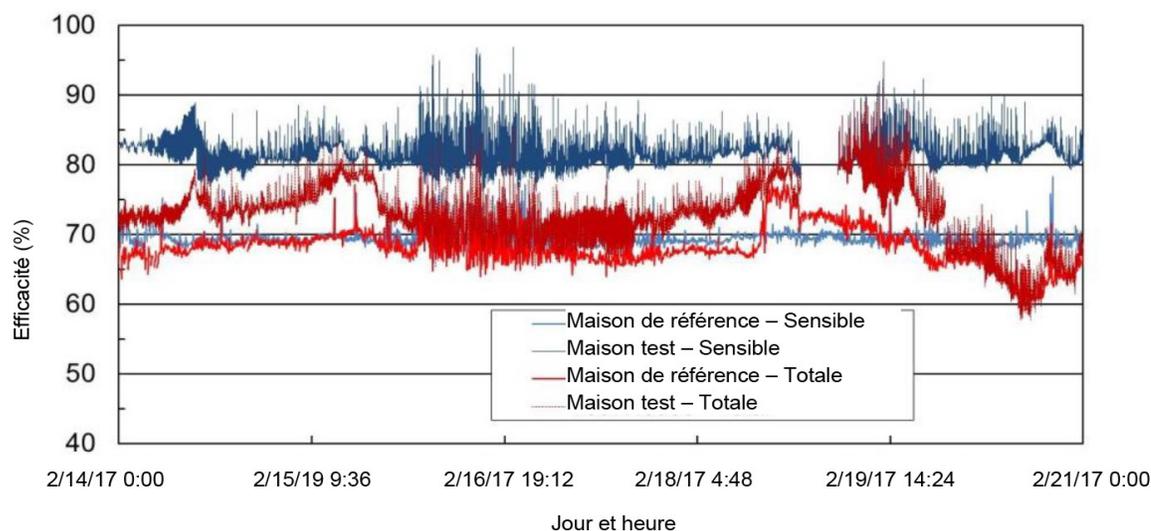


Figure 9 : ESA et ETA obtenus lors des essais côte à côte réalisés à l'aide des maisons jumelles du CCTR.

le VRÉ bibloc avait une valeur moyenne de 81,5 % et variait entre 76,2 % et 96,9 %. Le VRÉ monobloc de la maison de référence avait pour sa part une ESA moyenne de 69,5 % et variait entre 65,9 % et 78,3 %, ce qui représente une différence d'au moins 10 points de pourcentage. L'ETA, qui tient compte de la chaleur latente du VRÉ monobloc, variait entre 60,5 % et 77,7 %, avec une valeur moyenne de 68,1 %. Pour sa part, l'appareil VRÉ bibloc a enregistré une ETA entre 57,7 % et 92,3 %, avec une valeur moyenne de 72,7 %, ce qui est légèrement plus élevé que celle de l'appareil monobloc. Globalement, les résultats démontrent clairement que l'appareil VRÉ bibloc (dans la maison test) surclasse le VRÉ monobloc (dans la maison de référence) tant au niveau de l'efficacité sensible apparente que de l'efficacité totale apparente.

22,8 °C. Conformément à ce qui était attendu, les valeurs diminuaient lorsque la température de l'air soufflé extérieur diminuait. Lorsque la température extérieure était de -35 °C, la température de l'air soufflé atteignait 15,3 °C. Il s'agit de températures assez basses, qui doivent être tempérées soit en mélangeant l'air soufflé avec l'air des pièces ou en le préchauffant avant de l'acheminer aux espaces habités.

L'essai côte à côte du CCTR a démontré que la température de l'air soufflé à sa sortie (montré à la figure 10) du VRÉ monobloc de la maison de référence variait entre 11,5 °C et 17,9 °C. La moyenne des valeurs quotidiennes variait entre 13,4 °C et 16,6 °C et la valeur moyenne globale pour l'ensemble de la période d'essai était de 14,6 °C. La température de l'air soufflé à sa sortie du VRÉ bibloc dans la maison test variait entre

Les essais en laboratoire ont démontré que les températures de l'air soufflé mesurées dans des conditions d'activités intérieures déterminées par la norme CSA-C439 (Groupe CSA, 2018) variaient entre 15,9 °C et 20,6 °C. Les températures de l'air soufflé mesurées dans des conditions d'activités intérieures nordiques variaient entre 15,3 °C et

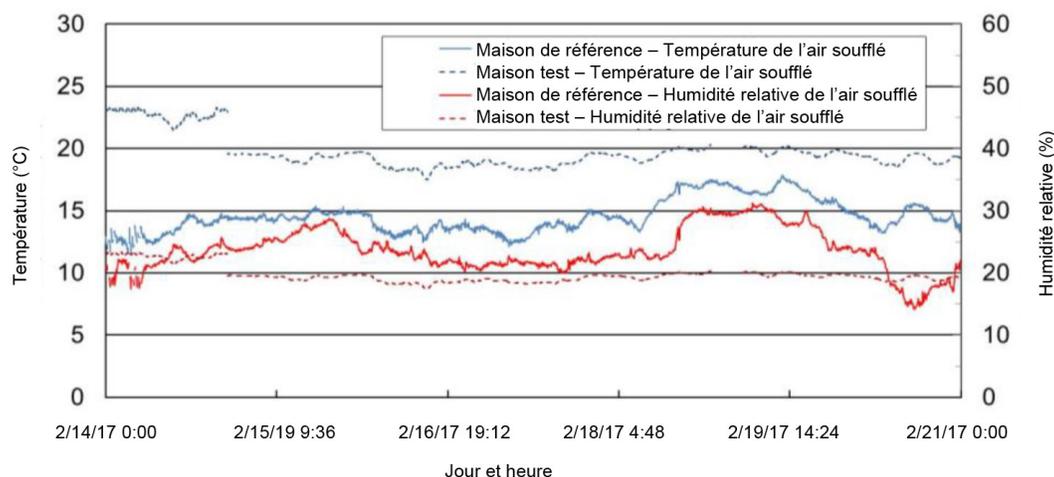


Figure 10 : Température de l'air soufflé mesurée lors des essais côte à côte.

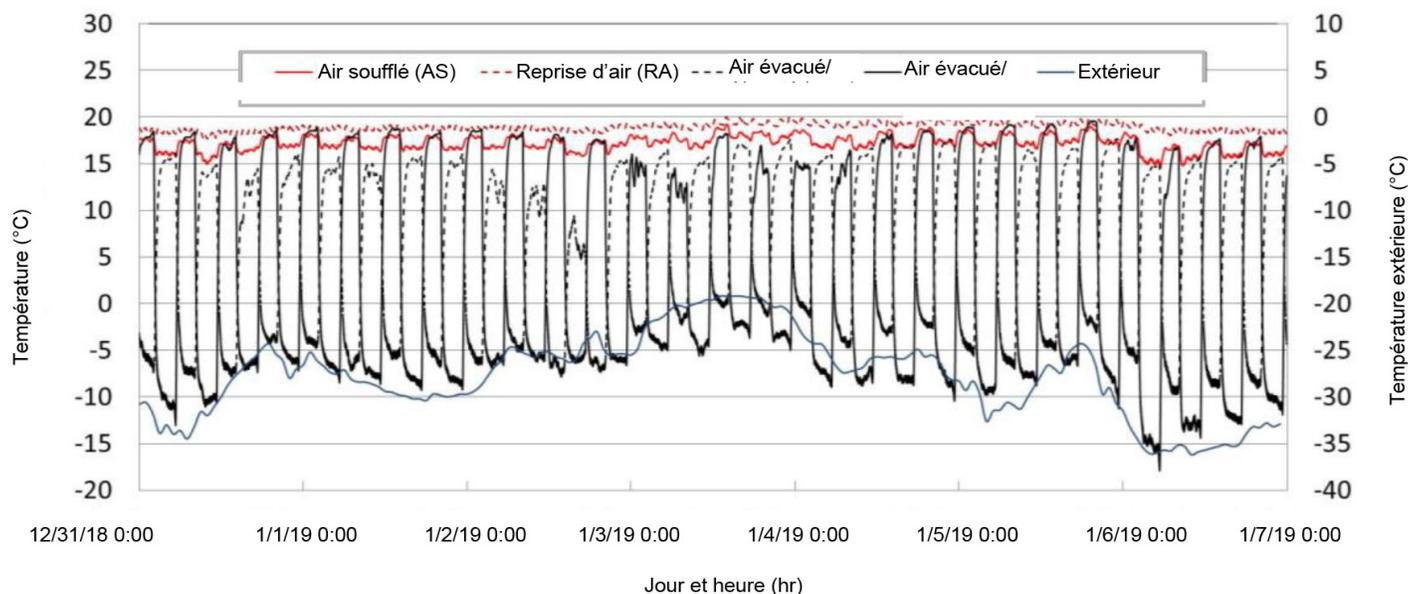


Figure 11 : Températures de l'air mesurées à Cambridge Bay (31 décembre 2018 au 6 janvier 2019).

17,5 °C et 20,3 °C. La moyenne des valeurs quotidiennes variait entre 18,7 °C et 19,6 °C et la valeur moyenne globale pour l'ensemble de la période d'essai était de 19,2 °C. La température de l'air soufflé dans la maison munie de l'appareil bibloc était supérieure (de 3 °C à 6 °C) à celle de l'appareil monobloc. Ce résultat est dû à l'ESA beaucoup plus élevée de l'appareil bibloc (> 80 %) générée par les deux noyaux à régénération cyclique. Cela signifie que la technologie bibloc est plus efficace pour la récupération de chaleur ou d'énergie.

Les changements de rendement de la maison réalisés par la technologie innovante ont été évalués à l'aide d'une comparaison entre le rendement de la maison test (équipée d'un VRÉ bibloc) et le rendement de la maison de référence (équipée d'un VRÉ monobloc). La consommation d'énergie enregistrée pour la maison test et la maison de référence comprend : la consommation d'énergie pour le chauffage (consommation en gaz naturel de la fournaise), la consommation électrique des ventilateurs de fournaise et la consommation électrique des ventilateurs des VRÉ monobloc et bibloc. Au cours d'une période d'essai côte à côte d'une semaine, la moyenne d'économie d'énergie pour le chauffage et la ventilation de la maison complète, lorsqu'un VRÉ bibloc était utilisé plutôt que le VRÉ de référence, était de 6,2 %.

La figure 11 présente les températures d'air mesurées à l'entrée et à la sortie des débits d'air soufflé et évacué lors de la surveillance prolongée du bibloc RGSP 300 à

Cambridge Bay ainsi que les températures extérieures. Le schéma représente la semaine du 31 décembre 2018 au 6 janvier 2019. La température extérieure se situait entre -19 °C et -36 °C. La température de l'air soufflé du VRÉ bibloc vers l'intérieur se situait entre 14,5 °C et 19,2 °C, avec une valeur moyenne de 17,2 °C. Le cycle de l'air extérieur et de l'air évacué est causé par le registre cyclique, qui dirige périodiquement l'air chaud et l'air évacué au travers d'un des deux échangeurs de chaleur. La surveillance prolongée du VRÉ bibloc sur le campus de la SCREA en Arctique a démontré sa performance et sa résilience dans un environnement nordique réel. Il s'est montré tolérant au givre et capable de supporter des températures extérieures sous -35 °C et de fournir un apport continu d'air extérieur.

## Conclusions

Cette recherche rigoureuse a démontré qu'en comparaison avec un VRÉ monobloc classique, le système VRÉ bibloc offre une ESA et une ETA plus grande, est plus tolérant au givre et est capable de supporter des températures extérieures sous les -30 °C. La conception bibloc n'a montré aucun problème face au givre, a offert un apport continu en air extérieur et a été en mesure de souffler de l'air à des températures allant jusqu'à 6 °C de plus que la température de l'air soufflé par un VRÉ monobloc. Dans des conditions climatiques extrêmes, la température de l'air soufflé a chuté sous une température acceptable. Pour corriger cette situation, un système de préchauffage activé

avant de souffler l'air à l'espace habité (intérieur) serait nécessaire. Toutefois, le VRÉ bibloc n'a pas gelé et a continué à fonctionner sans diminution d'échange d'air. Des travaux futurs se concentreront sur l'amélioration de la technologie bibloc afin d'en faire un système de ventilation à la demande, capable d'ajuster le taux de ventilation en fonction des besoins intérieurs (surpeuplement, grandes activités, etc.).

## Remerciements

Le présent projet de recherche (A1-009461) a été réalisé dans le cadre du Programme de recherche sur l'Arctique du Conseil national de recherches Canada, en collaboration avec la Société canadienne d'hypothèques et de logements (SCHL), Savoir polaire Canada (POLAIRE) et Tempeff North America. Il est soutenu grâce au financement offert par le Programme de recherche et de développement énergétiques (PRDE) de Ressources naturelles Canada et par le Programme de recherche sur l'Arctique du Conseil national de recherche du Canada. Le soutien logistique a été offert par la Station canadienne de recherche dans l'Extrême-Arctique (SCREA). Nous remercions Tempeff North America pour leur don d'un appareil VRÉ bibloc, leurs conseils et leur soutien. Nous remercions la SCREA de nous avoir donné accès à l'appareil installé dans le triplex du campus de la SCREA et de nous avoir offert du soutien technique et logistique.

## Références

ASHRAE. 2016. ANSI/ASHRAE Standard 62.2. Ventilation for acceptable indoor air quality. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) Inc.: Atlanta, GA.

CSA Group. 2018. C439-18 Laboratory Methods of Test for Rating the Performance of Heat/Energy-Recovery Ventilators. Canadian Standard Association (CSA): Toronto, Ontario.

Home Ventilating Institute (HVI). 2016. Retrieved from: <http://www.hvicertified.org>.

Rafati, M.N., Fauchoux, M., Besant, R., Simonson, C. 2014. A review of frosting in air-to-air energy exchangers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30:538-554.

Ouazia B., Swinton, M.C., Julien, M., Manning, M. 2006. Assessment of the enthalpy performance of houses using energy recovery technology. *ASHRAE Trans*, 112(1):26-33.

Zaloum, C. 2010. Technical advice to task force on Northern mechanical ventilation equipment design and testing. Canada Mortgage and Housing Corporation: Ottawa, Ontario.

# SENSIBILISATION AUX STIM POUR LES JEUNES ET LES ÉDUCATEURS DE LA RÉGION BEAUFORT-DELTA DES TERRITOIRES DU NORD-OUEST

A. Trimble<sup>1\*</sup> et H. Turko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut de recherche Aurora, Collège Aurora, Inuvik, Territoires du Nord-Ouest, Canada

<sup>2</sup> Institut de recherche Aurora, Collège Aurora, Fort Smith, Territoires du Nord-Ouest, Canada

\* [atrimble@auroracollege.nt.ca](mailto:atrimble@auroracollege.nt.ca)

## Résumé

Avec le soutien de Savoir polaire Canada, le Western Arctic Research Centre de l'Institut de recherche Aurora (IRA) offre aux étudiants, enseignants et communautés une programmation touchant la science, la technologie, l'ingénierie et les mathématiques (STIM) accrocheuse et interactive visant à améliorer la littératie scientifique et à établir un lien entre le savoir traditionnel et le savoir scientifique.

Les occasions pour les jeunes de participer à un apprentissage scientifique pratique sont limitées dans les Territoires du Nord-Ouest (TNO). Par conséquent, l'intérêt pour les sujets et les carrières reliés aux STIM peut être moindre que parmi les jeunes du sud du Canada. L'IRA offre des expériences d'apprentissage pratiques pour les jeunes, des séances de formation professionnelle et du soutien pour les enseignements et des événements pour la communauté afin d'encourager l'intérêt et la confiance envers les sciences. La programmation de sensibilisation aux STIM de l'IRA est dynamique, pertinente pour les enjeux et les programmes nordiques et répond aux besoins des éducateurs et des programmes jeunesse de la communauté. Une attention spéciale est portée à

l'intégration du savoir et des langues traditionnels dans la programmation STIM et les activités terrain, ce qui crée des expériences riches en apprentissages. L'IRA met également en lien des professionnels des STIM locaux et des chercheurs invités avec des jeunes et des membres de la communauté au moyen d'expérience d'apprentissage interactives et de conférences de vulgarisation scientifique. Établie dans le Nord, l'équipe de sensibilisation de l'IRA entretient une relation solide avec les groupes de la communauté et les écoles qu'elle dessert et offre une programmation soutenue, qui lui permet d'entrer en contact avec les jeunes et les éducateurs du Nord à plusieurs reprises pendant l'année scolaire. Le programme de sensibilisation de l'IRA est essentiel pour développer la capacité des éducateurs et des jeunes du Nord dans les domaines des STIM. La demande pour cette programmation est en augmentation et le programme de sensibilisation aux STIM, réactif et orienté vers la communauté, a été étendu pour inclure le South Slave Research Centre. Les projets futurs comprennent l'intégration du bureau de l'IRA à Yellowknife, afin d'atteindre les jeunes et les éducateurs des régions North Slave, Sahtu et Deh Cho.

### Références suggérées :

Trimble, A. and Turko, H. 2019. Sensibilisation aux STIM pour les jeunes et les éducateurs de la région Beaufort-Delta des Territoires du Nord-Ouest. *Savoir polaire : Aqhaliat* 2019, Savoir polaire Canada, p. 95–102. DOI: 10.35298/pkc.2019.09

## Introduction

Au cours des 15 prochaines années, plus de 25 000 emplois devront être comblés dans les Territoires du Nord-Ouest, la plupart d'entre eux nécessitant un diplôme postsecondaire et un grand nombre se trouvant dans des domaines liés aux sciences, à la technologie, à l'ingénierie et aux mathématiques (STIM) (gouvernement des Territoires du Nord-Ouest, 2016a). Les taux de diplomation dans les Territoires du Nord-Ouest sont toutefois systématiquement plus faibles que dans le reste du Canada. Les données comparatives les plus récentes indiquent un taux de diplomation pour les TNO de 52 %, ce qui est considérablement plus faible que la moyenne canadienne de 78 % (gouvernement des Territoires du Nord-Ouest, 2016b). Les résultats des étudiants en STIM sont également faibles — en 2013, le pourcentage d'étudiant ayant obtenu une moyenne acceptable en mathématiques de 9<sup>e</sup> année était de 37 % pour l'ensemble des TNO (gouvernement des Territoires du Nord-Ouest, s.d.). Lorsque ces résultats sont analysés plus en détail, on constate que les élèves des plus grands centres obtiennent des résultats plus élevés que ceux des communautés plus éloignées (gouvernement des Territoires du Nord-Ouest, s.d. ; Conference Board du Canada, 2016). Les étudiants ont besoin d'une exposition récurrente à des modèles professionnels et de participer à des activités liées aux STIM pour les encourager à obtenir de meilleurs résultats, à obtenir leur diplôme et à poursuivre une éducation postsecondaire. Malheureusement, les occasions pour les jeunes de participer à un apprentissage scientifique pratique sont limitées dans les Territoires du Nord-Ouest (TNO), particulièrement dans les communautés les plus éloignées. Par conséquent, l'intérêt pour les sujets et les carrières en STIM dans le Nord peut être moindre que parmi les jeunes d'ailleurs au Canada. Susciter l'intérêt et la participation des étudiants pour les sciences et améliorer la connaissance des carrières locales en STIM aura pour effet d'encourager plus de jeunes du Nord à poursuivre une éducation postsecondaire, puis à retourner dans les territoires pour occuper ces postes dans le nord du Canada.

Les écoles jouent un rôle essentiel dans la participation et la réussite des étudiants, ainsi que pour le développement du Nord du Canada. Malheureusement, plusieurs éducateurs des TNO n'ont pas les services requis et ont un accès limité à des occasions de formation professionnelle offrant une programmation liée aux STIM. Dans une enquête réalisée en 2016 par



Figure 1 : L'institut de recherche Aurora est situé dans les Territoires du Nord-Ouest. Son bureau principal est situé à Inuvik, mais il possède également des bureaux à Fort Smith et à Yellowknife.

Parlons sciences, il a été demandé à des enseignants d'Inuvik quels étaient leurs plus grands défis dans l'enseignement des sujets touchant les STIM. Les deux principales difficultés citées ont été « le manque de temps pour la planification d'activités pratiques et/ou de laboratoires » (choisie par plus de 90 % des répondants) et « trouver les ressources en STIM adéquates » (choisie par plus de 40 % des répondants) (enseignants d'Inuvik anonymes, Parlons sciences, 2016).

Dans le but de répondre de façon réelle et pratique à ces besoins, l'Institut de recherche Aurora (IRA) a modernisé ses initiatives de sensibilisation pour y inclure les jeunes et les éducateurs du Nord en :

- offrant des activités pratiques aux étudiants ;
- invitant des professionnels des STIM et en discutant des options de carrières liées aux STIM avec les classes ;

- rencontrant les enseignants et en leur offrant des ressources ; et
- offrant des ateliers de formation professionnelle centrés sur la transmission des connaissances liées aux STIM.

Basées dans les régions desservies par l'IRA, ces initiatives de sensibilisation aident le personnel à créer des liens avec les étudiants locaux et les éducateurs tout en offrant des ressources et une programmation pratique régulières.

## Développement et structure du programme

Le mandat de l'IRA est d'améliorer la qualité de vie des résidents des TNO par l'application du savoir scientifique, technologique et autochtone à la résolution de problèmes nordiques et à l'avancement d'objectifs sociaux et économiques. Sa mission est de faire progresser la capacité de recherche du territoire par la découverte, la sensibilisation et l'éducation. L'IRA exerce ses activités dans trois bureaux de recherche : le Western Arctic Research Centre à Inuvik, le South Slave Research Centre à Fort Smith et le North Slave Research Centre à Yellowknife (Figure 1).

L'IRA, qui est la section de recherche du Collège Aurora, est un organisme nordique qui entretient des liens étroits avec l'éducation et la mise en valeur du potentiel. Depuis longtemps, il travaille à l'amélioration de la littératie scientifique et à la communication scientifique auprès des résidents nordiques. Cet héritage se poursuit grâce à :

- ses liens avec les collèges et universités ;
- son implication auprès du public par des séries de conférences et des événements familiaux ;
- la sensibilisation dans les écoles, les camps et les garderies ; et
- ses contributions aux recherches sur le Nord et aux programmes de surveillance fondés sur la communauté.

L'IRA est un intervenant manifeste et actif tant au niveau de la recherche que de l'éducation dans les TNO.

Grâce à une collaboration fructueuse entre l'IRA, Parlons sciences et le Beaufort Delta Education Council, et avec le soutien de Savoir polaire Canada, le poste

de coordonnateur du programme de sensibilisation de l'IRA a été créé en 2016. Le but de ce poste est d'assister les éducateurs et les étudiants, tout en poursuivant les activités normales de sensibilisation de l'IRA. Basé à Inuvik, le coordonnateur du programme de sensibilisation dessert la région Beaufort-Delta, qui comprend huit communautés et neuf écoles, comptant environ 6 500 résidents et 1 500 étudiants. Le coordonnateur du programme de sensibilisation veille à ce que la programmation de sensibilisation aux STIM de l'IRA soit pertinente pour les étudiants locaux, les cours qu'ils suivent et l'endroit qu'ils définissent comme leur foyer. L'initiative de sensibilisation tient compte de la culture et des besoins de la communauté et se développe sur des relations et des partenariats nordiques forts.

Les écoles de la région Beaufort-Delta ont des programmes de retour à la terre inscrits dans leur année scolaire et ce sont souvent ces environnements d'apprentissage qui sont les plus riches. Ils offrent une plateforme naturelle aux étudiants pour explorer les principes du monde naturel, penser à la gestion de la terre et de la faune et gagner de l'expérience pratique avec les outils et techniques de surveillance environnementale qui pourront leur être utiles plus tard dans leur vie. L'IRA comprend l'importance d'établir des liens entre le savoir traditionnel, local et scientifique.

Grâce au programme de sensibilisation aux STIM, l'IRA est en mesure de répondre tant à de l'ampleur que de la profondeur de l'implication pour les étudiants et les éducateurs. Établi dans la région desservie par le programme de sensibilisation, le personnel du programme de sensibilisation de l'IRA est en mesure de créer des relations avec les étudiants et les éducateurs locaux. L'IRA offre également des ressources et une programmation dynamique tout au long de l'année, dans des écoles qui n'accueillaient auparavant des équipes de sensibilisation aux STIM qu'une seule fois par année ou à quelques années d'intervalle. Ce modèle d'offre crée de nombreuses interactions avec les étudiants tout au long de leur parcours scolaire.

## Mettre les jeunes du Nord en contact avec des modèles professionnels et des carrières nordiques

Le Western Arctic Research Centre accueille plus de 200 chercheurs invités annuellement, et plusieurs

d'entre eux étudient les sciences naturelles. Cette communauté de professionnels de la recherche constitue une précieuse ressource. Le personnel de l'IRA met à profit cette communauté pour créer des documents de sensibilisation aux STIM et réaliser des visites de classes et de communautés. Le personnel de l'IRA s'inspire également de ses partenaires nordiques en science et en éducation. De nombreux professionnels des STIM vivent dans les communautés du Nord, des agents de protection de la faune et des parcs aux spécialistes de la qualité de l'eau et aux ingénieurs du pergélisol. L'IRA met des professionnels des STIM locaux et des chercheurs invités en lien avec des jeunes et des membres de la communauté par des expériences d'apprentissage interactives et des conférences de vulgarisation scientifique. Le fait de faciliter les interactions entre les jeunes et les professionnels des STIM et de présenter des options de carrières locales dans les communautés nordiques aide à faire connaître l'existence d'emplois excitants, près de la maison. L'IRA travaille de concert avec l'éducateur hôte et le professionnel des STIM invité pour s'assurer que la visite prévoit des activités pratiques et qu'elle est étroitement liée au programme d'enseignement. Lorsque ces visites ont lieu sur le terrain, l'expérience d'apprentissage est particulièrement enrichissante, tant pour les étudiants que pour les invités.

## Orientation du programme

Le programme de sensibilisation aux STIM de l'IRA se concentre sur trois publics cibles.

### 1. Sensibilisation des étudiants

Les activités dans les écoles comprennent des leçons pratiques et interactives visant à accroître l'intérêt et les connaissances liés aux STIM. Les étudiants peuvent participer à des leçons captivantes sur les STIM et utiliser certaines des technologies les plus novatrices en éducation, comme le codage et la conception et impression 3D. Le personnel de l'IRA travaille avec les écoles et leurs programmes sur le terrain pour offrir un aperçu de la façon dont le savoir traditionnel et scientifique peuvent aller de pair. Les jeunes apprennent sur le passé, le présent et le futur de nos régions. L'IRA met les étudiants en lien avec des professionnels et des chercheurs des STIM locaux afin de leur offrir des expériences pratiques et d'accroître leurs connaissances sur les carrières liées aux STIM (Figure 2). Les étudiants de toute la région ont également l'occasion de



Figure 2 : Des chercheurs en hydrologie offrent aux étudiants une série de défis utilisant des instruments et des concepts scientifiques qui font le lien entre le manteau neigeux et la santé des cours d'eau, la faune et la fréquence des feux de forêt.

participer au Inuvik Robotics and Engineering Club (Club de robotique et d'ingénierie d'Inuvik), en personne ou par vidéoconférence, et de participer à plusieurs défis variés, passant du développement d'un jeu vidéo à la participation au projet de satellite cubique de l'IRA.

### 2. Sensibilisation des enseignants

Le coordonnateur du programme de sensibilisation de l'IRA travaille avec les enseignants de façon individuelle et en petits groupes pour leur offrir de la formation professionnelle et les soutenir avec les leçons, les activités et les ressources liées aux STIM. Un enseignement au primaire pourrait par exemple demander des ressources et des idées pour enseigner la structure et la stabilité à ses élèves. En réponse à cette demande, l'IRA pourrait chercher des défis en ingénierie pour les étudiants, ou planifier une visite sur le terrain pour constater comment la fonte du pergélisol touche les infrastructures nordiques. Les ressources offertes par



Figure 3 : Des enfants de la garderie découvrent le soleil, la lune et les ombres surprenantes qu'une éclipse solaire peut faire.

L'IRA sont adaptées au programme d'étude, pertinentes localement et répondent aux besoins des enseignants avec lesquels l'IRA travaille dans le Nord (Figure 3). Une attention particulière est portée à l'inclusion du savoir traditionnel et des langues des régions nordiques. À mesure que les enseignants acquièrent une plus grande confiance dans l'enseignement de la programmation STIM, l'IRA continuera d'offrir son soutien afin de renforcer la capacité d'offrir des leçons interactives dans les écoles.

### 3. Sensibilisation du public

L'IRA offre une plateforme à partir de laquelle les communautés nordiques peuvent poser des questions, commenter et demander des renseignements sur les sciences et la recherche ayant lieu dans le Nord. La série



Figure 4 : Science Rendezvous offre au public la chance d'explorer la science se trouvant derrière les communautés nordiques, chaque organisation locale offrant des activités pratiques aux participants.

de conférences scientifiques de l'IRA, où les résidents de la communauté peuvent entendre des conférences de vulgarisation sur la recherche, est l'un de nos événements de sensibilisation les plus populaires. Ces conférences présentent des scientifiques et des chercheurs qui travaillent et voyagent dans notre région et qui étudient des sujets variés, passant du pergélisol à l'archéologie. L'IRA accueille et soutien également des événements de STIM conviviaux pour les familles, comme le Science Rendezvous de la communauté à Inuvik (Figure 4) et le Dark Sky Festival tenu à Fort Smith, la plus grande réserve de ciel étoilé au monde. Ces événements familiaux favorisent la confiance et les liens avec les jeunes du Nord, qui explorent et apprennent avec leurs parents et leurs pairs.

## Commentaires des participants

Après une visite dans une classe, nous avons demandé aux élèves : « *Qu'avez-vous appris aujourd'hui ? Qu'est-ce qui vous a surpris ?* »

Un garçon de sixième année a répondu : « *Que la science est amusante. Et que je suis bon en science.* »

« *Je voulais simplement vous envoyer un petit mot de remerciement pour notre séance de formation professionnelle pratique. Cela a été si agréable, et a été une bonne source d'idées et d'activités à faire avec nos classes ! Elles étaient toutes facilement faisables, prévoyaient un accès facile au matériel et avaient un facteur « wow » pour les enfants. Merci ! J'espère que nous aurons plus de séances de formation professionnelle ensemble à l'avenir.* » – Enseignant au primaire.

« *Une fois de plus, un grand merci pour votre aide ! Nous avons vraiment eu un bel après-midi et les enfants en avaient LONG à dire lorsque nous sommes revenus. Je peux seulement imaginer tout ce qu'ils auront à raconter à leurs parents quand ils rentreront à la maison.* » – Enseignant au primaire, après une exploration extérieure des plantes locales et de leurs usages traditionnels.

« *J'observais de loin alors que plusieurs enfants interagissaient avec l'énorme carte ; ils intégraient les apprentissages, tout en ayant beaucoup de plaisir. Merci à votre équipe pour toute la préparation minutieuse de chacune des activités, remplies d'apprentissages et de plaisir !* » – Directeur d'école primaire, après une séance de GeoWeek.

Tableau 1 : Mesures du programme de sensibilisation de l'IRA. Les mesures relatives aux participants reflètent le nombre total de participants rejoint pour des événements multiples, et non le nombre de personnes uniques rejointes. Le poste de coordonnateur à la sensibilisation a été créé en 2016 pour aider les étudiants et les éducateurs de la région Beaufort-Delta, tout en poursuivant les activités de sensibilisation usuelles de l'IRA. L'objectif du programme est d'être en contact avec les résidents du Nord à plusieurs reprises au cours d'une même année, ce programme étant offert tout au long de l'année.

	2015	2016 : Année 1	2017 : Année 1	2018 : Année 1
Sensibilisation des jeunes (De la maternelle à la 12e année)	7 événements 1 110 jeunes 1 communauté	18 événements 466 jeunes 1 communauté	41 événements 1 204 jeunes 2 communautés	147 événements 2 819 jeunes 6 communautés
Sensibilisation des jeunes (De la maternelle à la 12e année)	Aucune	2 événements 5 enseignants de 1 communauté	8 événements 58 professeur de 8 communautés	14 événements 127 enseignants de 8 communautés
Sensibilisation des jeunes (De la maternelle à la 12e année)	8 événements 237 participants	13 événements 457 participants	20 événements 944 participants	26 événements 1 070 participants
Sensibilisation des jeunes (De la maternelle à la 12e année)	8 intervenants 9 événements 145 participants	27 intervenants 14 événements 277 participants	28 intervenants 13 événements 311 participants	40 intervenants 15 événements 325 participants

« Je voulais vous remercier pour le temps que nous avons passé ensemble, et pour tout le temps et l'enthousiasme que vous mettez continuellement dans la sensibilisation ! Vous êtes formidables ! J'ai vraiment apprécié passer du temps avec vous et je suis très reconnaissant de pouvoir travailler avec vous sur le terrain ! » – Équipe de sensibilisation de Parlons sciences.

« Nous voulons vous remercier d'être venu et d'avoir fait ressortir un intérêt caché chez certains enfants, que nous n'avions jamais perçu en travaillant avec eux, ici, à la bibliothèque. C'était bon de voir les enfants participer et s'amuser. Nous attendons avec impatience notre prochaine séance avec vous. » – Coordonnateur de la bibliothèque publique et du programme parascolaire.

## Accroissement de la demande

La première année du programme de sensibilisation aux STIM de l'IRA avait pour objectif d'établir des liens avec les éducateurs et à faire connaître le soutien disponible pour la transmission du savoir lié aux STIM. L'objectif était également de créer des activités de sensibilisation qui intégraient le contexte nordique aux principes quotidiens des STIM. À mesure que le programme s'est mis en place, la demande s'est répandue, tout comme la demande. Le tableau 1 montre que le nombre d'interactions avec les jeunes, de séance de formation professionnelle et d'événements dans la communauté a augmenté chaque année.

## Croissance

En 2018, le programme de sensibilisation aux STIM de l'IRA a été étendu à la région South Slave et un poste à temps partiel de coordonnateur à la sensibilisation a été ajouté au South Slave Research Centre à Fort Smith. La région South Slave est constituée de sept communautés et de huit écoles et compte environ 8 000 résidents. En moins d'un an, le personnel de l'IRA a offert de nombreuses occasions d'apprentissages stimulantes liées aux STIM pour les jeunes, les enseignants et les familles, notamment :

- un camp d'été Actua d'une semaine, tenu à Fort Smith pour plus de 30 jeunes ;
- le premier jour des sciences familial, qui a attiré plus de 40 participants ;

- une visite de Nagin Cox, un ingénieur spécialiste des opérations de véhicules spatiaux du Jet Propulsion Laboratory de la Nasa ; et
- de la formation professionnelle pour les enseignants sur la pensée du design (Design Thinking) et la pensée computationnelle (Computational Thinkin).

Un nouveau cours de science, technologie, ingénierie, arts et mathématiques (STIAM) a été mis en place pour les classes de premier cycle du secondaire de Fort Smith. L'IRA a offert du soutien aux enseignants sous forme de planification concertée et de modèles de leçons pratiques. Au cours des 10 derniers mois, des liens se sont créés avec la communauté et les écoles et les gens sont impatients d'avoir plus d'activités de sensibilisation. L'IRA a été en mesure d'entrer en contact et d'offrir du soutien à au moins un enseignant de chacune des écoles du South Slave Divisional Education Council.

La réponse à un atelier donné en collaboration avec Parlons sciences a été extrêmement positive :

« Je n'ai pas eu de formation professionnelle aussi concrète depuis longtemps ! Les activités offertes étaient bénéfiques et utiles. J'ai déjà utilisé la plupart des activités dans ma classe. »

« J'ai beaucoup apprécié l'atelier, comme je suis certaine que vous l'avez remarqué en voyant mon intérêt et mon enthousiasme ! Les [ensembles de codage] sont super et je les ai déjà utilisés... et j'ai suscité leur intérêt à approfondir l'utilisation de ces articles. »

Par l'intermédiaire d'activités pratiques, le programme de sensibilisation aux STIM de l'IRA a soutenu les jeunes dans leurs découvertes de nouveaux concepts, en faisant appel à leur esprit critique et à des occasions d'apprentissages fondées sur la découverte. Des clubs STIAM sont lancés dans la région, le codage et les robots sont utilisés dans les salles de classe et les défis de conception STIAM aident à faire le lien entre les résultats du programme d'enseignement et les problèmes du monde réel.

L'IRA poursuit sa programmation de sensibilisation dans la région South Slave et des jeunes, des familles et des organisations locales continueront de bénéficier d'occasions d'établir un lien entre le savoir scientifique

et le savoir traditionnel sur le terrain. L'IRA offre du soutien aux nouveaux enseignants au moyen d'ateliers scientifiques pratiques pour les étudiants du baccalauréat en éducation du Collège Aurora. Par son programme de sensibilisation, l'IRA prévoit également de continuer à offrir des occasions aux jeunes de développer leurs capacités à utiliser la pensée critique, à poser des questions importantes et innovantes, à étudier les problèmes et à être impliqués dans leur apprentissage.

## Prochaines étapes

L'IRA reconnaît la valeur de ce programme de sensibilisation et travaillera à assurer sa pérennité. L'IRA espère obtenir du financement à long terme pour maintenir et étendre les programmes de sensibilisation concluants établis dans les régions Beaufort-Delta et South Slave, encadrer du personnel supplémentaire dans leurs compétences de sensibilisation et offrir une programmation plus régulière aux communautés éloignées. En temps et lieu, l'IRA souhaite étendre le programme de sensibilisation aux STIM à la région North Slave, puisqu'il possède déjà un bureau à Yellowknife. Dans cette lancée, l'IRA aimerait également atteindre les jeunes et les éducateurs des régions Sahtu et Deh Cho.

Même à ce jour, ce programme fondé sur la communauté et adapté aux besoins demeure un modèle pour la promotion des sciences dans les régions éloignées et mal desservies. Le personnel de l'IRA est impatient de créer de nouveaux liens, d'inspirer plus d'étudiants et de voir plus d'éducateurs outillés, dans la continuité de ce programme de sensibilisation.

## Remerciements

Nous remercions chaleureusement nos partisans et collaborateurs dans cette initiative : Savoir polaire Canada, Parlons sciences, le Beaufort Delta Education Council, le programme PromoScience du CRSNG et

l'Agence spatiale canadienne. Grâce à leur soutien, ils ont rendu ce programme possible. Nous remercions également les écoles et les enseignants de nous avoir ouvert leurs portes, et les chercheurs, les professionnels des STIM de la communauté et les anciens, qui ont pris le temps de communiquer leur expérience et leurs connaissances de façon interactive, au bénéfice de nos jeunes et de nos éducateurs du Nord.

## Références

Government of the Northwest Territories. 2016a. Skills 4 Success, NWT Jobs in Demand: 15-Year Forecast. Retrieved from: [https://www.ece.gov.nt.ca/sites/ece/files/resources/ece\\_s4s\\_report\\_-\\_webready.pdf](https://www.ece.gov.nt.ca/sites/ece/files/resources/ece_s4s_report_-_webready.pdf)

Government of the Northwest Territories. 2016b. Graduation Rates in the NWT. Retrieved from: [https://www.ece.gov.nt.ca/sites/ece/files/resources/fact\\_sheet\\_-\\_graduation\\_rates\\_in\\_the\\_nwt\\_-\\_updated\\_november\\_2016.pdf](https://www.ece.gov.nt.ca/sites/ece/files/resources/fact_sheet_-_graduation_rates_in_the_nwt_-_updated_november_2016.pdf)

Government of the Northwest Territories. No date. 2012–2013 Alberta Achievement Tests, Backgrounder. Accessed July 1, 2019. Retrieved from: <https://www.gov.nt.ca/sites/flagship/files/documents/backgrounder-2012-13-attendance-and-aat-results.pdf>

The Conference Board of Canada. 2016. Labour Market Information Resource: Northwest Territories Labour Market Forecast and Needs Assessment. The Conference Board of Canada: Ottawa, Ontario. Retrieved from: [https://www.ece.gov.nt.ca/sites/ece/files/resources/skills\\_4\\_success\\_-\\_labour\\_market\\_resource.pdf](https://www.ece.gov.nt.ca/sites/ece/files/resources/skills_4_success_-_labour_market_resource.pdf)

Northwest Territories Bureau of Statistics. 2017. Community Population Estimates by Ethnicity: Northwest Territories, July 1, 2017. Retrieved from: [https://www.statsnwt.ca/population/population-estimates/commethnicity\\_2001-2017.xlsx](https://www.statsnwt.ca/population/population-estimates/commethnicity_2001-2017.xlsx)

# ACCORD SUR LE RENFORCEMENT DE LA COOPÉRATION SCIENTIFIQUE INTERNATIONALE DANS L'ARCTIQUE : RÉFLEXIONS SUR LE RÔLE DU CANADA

E. Arsenault,<sup>1</sup> G. Song<sup>1,2</sup> et A. Pigford<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> *Savoir polaire Canada, Ottawa, Ontario, Canada*

<sup>2</sup> *Faculté de droit, Université d'Ottawa, Ottawa, Ontario, Canada*

<sup>3</sup> *Faculté des sciences de l'agriculture et de l'environnement, Université McGill, Montreal, Québec, Canada*

\* [emma.arsenault@polar.gc.ca](mailto:emma.arsenault@polar.gc.ca)

## Coopération scientifique dans l'Arctique

La coopération scientifique a été, et continue d'être, une caractéristique essentielle du paysage politique dans l'Arctique circumpolaire. À la fin des années 1980, les États de l'Arctique ont commencé à s'intéresser à la science comme moyen de favoriser des relations productives dans cette région d'importance mondiale. La création du Comité international pour les sciences arctiques en 1990, ainsi que les efforts globaux de coopération pour créer la Stratégie de protection de l'environnement arctique de 1991, sont des signes avant-coureurs du potentiel unificateur de la science aux extrémités nordiques du globe. Cette tendance s'est poursuivie au 21<sup>e</sup> siècle, la science devenant un moteur important du développement et de l'expansion des structures de gouvernance de l'Arctique par le Conseil de l'Arctique (Murray, 2014).

Considérant la complexité et l'interconnexion de plusieurs des enjeux auxquels l'Arctique est confronté, la coopération internationale est cruciale. Les États arctiques, et de plus en plus les États non arctiques, doivent améliorer leur capacité à collaborer, à utiliser l'expertise disponible et à résoudre collectivement des problèmes comme celui des conséquences des

changements climatiques (Berkman et al., 2017). Le récent *Accord sur le renforcement de la coopération scientifique internationale dans l'Arctique du Conseil de l'Arctique* (l'Accord) réaffirme l'importance des sciences dans une époque de changements sans précédent dans les régions polaires. La recherche inclusive et opportune sur la protection de l'environnement, l'extraction des ressources et la sécurité maritime dans l'Arctique donnera lieu à une gouvernance efficace sur ces questions. La production de connaissances dans ces domaines peut notamment influencer des programmes politiques plus larges au sein du Conseil de l'Arctique (Binder, 2016). Grâce à cet Accord, la science peut être utilisée comme un outil de soutien aux processus décisionnels collectifs entre les divers acteurs représentés au Conseil de l'Arctique.

Une approche politique fondée sur des données probantes est particulièrement importante dans un forum comme le Conseil de l'Arctique, où les connaissances autochtones et locales sont nécessaires pour garantir que les activités de recherche sont documentées par les habitants locaux de l'Arctique et qu'elles leur sont utiles. Les connaissances autochtones

### Référence suggérée :

Arsenault, E., Song, G. and Pigford, A. 2019. *Accord sur le renforcement de la coopération scientifique internationale dans l'Arctique : réflexions sur le rôle du Canada*. *Savoir polaire* : Aqhaliat 2019, *Savoir polaire Canada*, p. 103-106. DOI: 10.35298/pkc.2019.11

et locales sont un ensemble de connaissances [Traduction] « acquises par l'intermédiaire de pratiques culturelles et d'expériences vécues, notamment des observations, des leçons et des compétences étendues et multigénérationnelles » (Arctic Council Indigenous Peoples' Secretariat, 2019). Elles sont fondamentales pour comprendre les aspects humains et environnementaux de l'Arctique, ainsi que pour appliquer cette compréhension à un contexte mondial. Depuis la formation de réseaux de recherche circumpolaire, les peuples autochtones du Nord ont toujours plaidé en faveur de l'inclusion du savoir autochtone dans la science arctique, et ils continuent de le faire aujourd'hui à titre de participants permanents au Conseil de l'Arctique. Ces efforts renforcent la nécessité pour les scientifiques de travailler en collaboration avec les détenteurs du savoir autochtone, et pour les décideurs de l'Arctique d'inclure des voix nombreuses et variées.

### **Accord sur le renforcement de la coopération scientifique internationale dans l'Arctique**

Le processus visant à formaliser et à renforcer la collaboration scientifique dans l'Arctique circumpolaire a été lancé en 2013, lors de la dernière présidence canadienne du Conseil de l'Arctique. Entre 2013 et 2017, un groupe de travail sur la coopération scientifique, composé de participants permanents et d'experts scientifiques, a cerné les obstacles actuels à la science arctique et a élaboré un processus visant à soutenir la coopération scientifique entre les États arctiques. Les efforts de ce groupe de travail ont conduit à la signature de l'Accord lors de la réunion ministérielle du Conseil de l'Arctique en mai 2017 à Fairbanks, en Alaska. C'est à ce moment que le Canada, le Danemark, la Finlande, l'Islande, la Norvège, la Russie, la Suède et les États-Unis sont devenus parties à l'Accord. L'Accord est entré en vigueur en mai 2018, après sa signature et sa ratification par les huit États arctiques.

L'accord est soumis aux lois, règlements, procédures et politiques en vigueur, y compris les droits existants des peuples autochtones. Il ne vise pas à modifier la législation ou la réglementation nationale existante. Il s'engage plutôt à faciliter les activités scientifiques dans l'Arctique et, en retour, à améliorer l'efficacité et l'efficacité de la production de connaissances dans la région. Pour remplir leurs engagements en vertu

de l'Accord, les États de l'Arctique doivent aborder les points suivants au sein de leurs réseaux scientifiques nordiques respectifs :

- **Accès**—soutenir la collaboration internationale par l'accès aux domaines de recherche, aux infrastructures et aux installations, ainsi qu'aux données.
- **Éducation**—offrir aux étudiants de tous les niveaux d'enseignement la possibilité d'acquérir une expérience et une expertise dans le domaine des sciences arctiques.
- **Intégration**—permettre à une variété de systèmes de connaissances occidentales, autochtones et traditionnelles de contribuer à la science arctique.

### **L'Accord en contexte canadien**

Le Nord canadien présente d'importantes variations géopolitiques et environnementales qui contribuent à un paysage de recherche dynamique et évolutif. Le Nord compte également plus de 100 000 résidents, dont des autochtones. Ensemble, ces facteurs exigent que les chercheurs individuels et les grands réseaux de recherche soient conscients des besoins des habitants du Nord et des autochtones et y répondent. Les régions polaires continuent d'être au centre des discussions mondiales sur la recherche sur le changement climatique et les stratégies d'atténuation et il existe de nombreuses possibilités pour les chercheurs internationaux de collaborer à des initiatives de recherche dans des domaines d'intérêt commun avec le Canada et les habitants du Nord. Cependant, le Nord canadien présente des difficultés considérables pour les chercheurs étrangers, qu'il s'agisse de s'y retrouver dans les juridictions infranationales et les exigences régionales, ou de se préparer à des conditions environnementales extrêmes et à des endroits éloignés. C'est dans ce contexte que la mise en œuvre de l'Accord peut être utile.

Au Canada, l'Accord sera mis en œuvre au Yukon, dans les Territoires du Nord-Ouest, au Nunavut, au Nunavik (nord du Québec), au Nunatsiavut (nord du Labrador) et dans les zones marines adjacentes. Savoir polaire Canada (POLAIRE) est responsable de la mise en œuvre de l'accord dans les domaines de recherche terrestre pertinents au Canada, tandis qu'Affaires mondiales Canada est responsable des demandes de recherche scientifique marine émanant d'organismes d'État étrangers.



Figure 1 : Zones géographiques déterminées, telles que décrites à l'annexe 1 de l'Accord sur le renforcement de la coopération scientifique internationale dans l'Arctique.

Étant donné l'étendue et la diversité du Nord canadien, POLAIRE s'efforce de faciliter la coopération scientifique dans la région en fournissant une plateforme permettant de consolider et de communiquer des renseignements aux chercheurs. Au cours des années 2017 et 2018, des activités de mobilisation ont été menées avec les gouvernements fédéral, territoriaux, régionaux et autochtones, ainsi qu'avec les réseaux de recherche nordique. L'objectif était de mieux comprendre les autorités et les processus de recherche régionaux et de recueillir des informations sur les domaines où une coordination est nécessaire. Ce travail a également tenu compte des commentaires sur la mobilisation reçus lors de l'élaboration du cadre stratégique pour l'Arctique et le Nord du gouvernement du Canada, ainsi que du cadre de sciences et de technologie et du plan stratégique de POLAIRE. Ces efforts de mobilisation ont consisté à se rendre dans les régions nordiques du Canada, à solliciter des commentaires par le biais d'observations écrites et à mener des actions de sensibilisation ciblées par le biais de communications par courriel.

## Priorités canadiennes pour la recherche nordique

Alors, qu'est-ce qui a été entendu ? Au cours de ces séances de discussion, les collaborateurs nordiques ont communiqué des renseignements et de la rétroaction sur leurs besoins et leurs souhaits pour le futur de la recherche arctique au Canada. Voici quelques points saillants :

- Respect du savoir autochtone et des exigences locales :** Des efforts continus sont nécessaires pour garantir que les chercheurs et les gouvernements reconnaissent et intègrent pleinement le savoir autochtone dans la recherche et la prise de décision. En outre, il faut faire davantage pour garantir le respect des processus d'autorisation et des exigences en matière de rapports. Des améliorations dans ces domaines sont nécessaires pour les chercheurs nationaux et internationaux.
- Implication des communautés locales :** Grâce à la National Inuit Strategy on Research (stratégie nationale inuite pour la recherche), des collaborateurs inuits comme Tapiriit Kanatami ont clairement exprimé leur vision de l'autodétermination et de la gouvernance des Inuits dans la recherche arctique. Les collaborateurs du Nord et autochtones souhaitent jouer un plus grand rôle de leadership en recherche lorsque les chercheurs invités viennent dans le Nord canadien. Les communautés locales doivent être impliquées tout au long du processus. Il s'agit notamment de faire participer les communautés locales sur ce qui est recherché, comment la recherche est menée et quels résultats ont été obtenus. Les collaborateurs ont toutefois également souligné la capacité limitée des communautés et des organisations nordiques et autochtones, qui constitue actuellement un obstacle à leur implication et à leur leadership dans les projets de recherche.
- Coordination de la recherche :** Conformément aux expériences d'autres pays en matière de recherche arctique, l'engagement auprès des collaborateurs a démontré qu'il est nécessaire de renforcer la coordination, la gestion et le partage de la recherche. Il faut également promouvoir davantage les partenariats de recherche internationaux et les possibilités de collaboration.

## Soutien au perfectionnement de la recherche nordique

En fonction de ces commentaires, l'approche de POLAIRE dans la mise en œuvre de l'Accord au Canada consiste à offrir des ressources pour renseigner les chercheurs sur les procédures régionales et les meilleures pratiques en matière de recherche nordique, en plus de faciliter la coordination des projets de recherche dans le Nord canadien. Ces ressources en ligne comprendront :

- un résumé détaillé des « étapes » requises pour mener des recherches en temps opportun et de façon respectueuse, qui servira d'outil d'orientation ;
- une page web qui fournit des informations détaillées sur les processus, les éléments à prendre en considération et les contacts pour la recherche nordique ; et
- des liens vers des ressources spécifiques aux régions pour poursuivre la lecture et obtenir plus d'information.

Ces ressources seront notamment utiles aux réseaux de recherche nationaux et internationaux, qui en feront la promotion.

En rassemblant et en consolidant les renseignements sur la recherche dans le Nord canadien, POLAIRE souhaite s'assurer que les chercheurs sont en contact avec les autorités et les réseaux de recherche appropriés. Cette approche reconnaît que les organismes infranationaux peuvent être mieux placés pour répondre aux besoins des chercheurs invités, et que POLAIRE ne propose pas de les remplacer dans leur travail. En mettant en œuvre l'Accord, POLAIRE entend plutôt améliorer la communication au sein de ces réseaux, rendre les informations dont les chercheurs ont besoin facilement accessibles, et offrir aide et conseils au besoin.

En collaboration avec des organismes autochtones et nordiques, POLAIRE s'efforce également de relever les défis que l'intensification des activités de recherche peut présenter pour les communautés nordiques. Des ressources supplémentaires et des mesures de renforcement des capacités sont nécessaires pour garantir que les collaborateurs du Nord puissent répondre et participer aux activités de recherche

dans leur région, et que des fonds soient réservés pour soutenir les organisations et les communautés nordiques de cette manière. Ces efforts sont essentiels pour soutenir le leadership du Nord dans la collaboration scientifique internationale.

## Prochaines étapes

L'Accord sur le renforcement de la coopération scientifique internationale dans l'Arctique prévoit que les parties doivent se rencontrer dans l'année suivant la mise en œuvre de l'Accord. En mars 2019, les représentants nationaux des huit États arctiques se sont réunis pour discuter des réussites et des obstacles rencontrés à ce jour dans le cadre de leurs stratégies nationales de mise en œuvre. Ce forum a été la première occasion de créer de nouveaux mécanismes de communication et de coordination entre les parties depuis la ratification.

À l'échelle nationale, les travaux se poursuivront pour renforcer les stratégies et les ressources de la stratégie de mise en œuvre du Canada. Ces outils doivent demeurer souples pour s'adapter à la croissance et aux changements continus au sein de la communauté de recherche nordique. POLAIRE demeurera en contact avec ses principaux collaborateurs et intervenants du Nord du Canada pour s'assurer que les ressources sont à jour et conformes aux meilleures pratiques.

## Références

- Arctic Council Indigenous Peoples' Secretariat. 2019. Indigenous knowledge. Retrieved from: <https://www.arcticpeoples.com/our-work-2/#traditional-knowledge-1>
- Berkman, P.A., Kullerud, L., Pope, A., Vylegzhani, AN., Young, OR. 2017. The Arctic Science Agreement propels science diplomacy. *Science*, 358(6363), p. 596-598. DOI: 10.1126/science.aag0890.
- Binder, C. 2016. Science as catalyst for deeper Arctic cooperation? *Science diplomacy & the transformation of the Arctic Council*. Akureyri, Iceland: Northern Research Forum, Arctic Yearbook 2016, p. 156-169.
- Murray, K. 2014. The Arctic Council: a brief history, its partnership with Indigenous groups of the Arctic, and its role in uncovering and addressing health issues in the Far North. *Journal of the Canadian Health Libraries Association*, 35, p. 27-31. DOI: 10.5596/c14-006.